

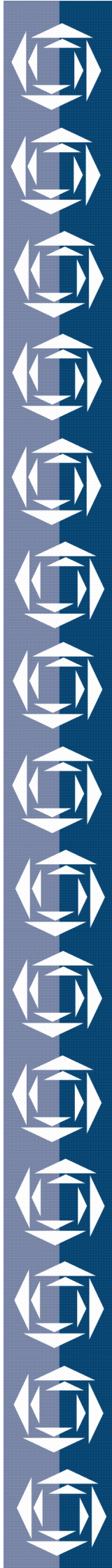


UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM TUBO
COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO
COM FIBRA DE CARBONO**

Fredi Guth

Lajeado, junho de 2018



Fredi Guth

**DESENVOLVIMENTO DE UM TUBO
COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO COM FIBRA DE
CARBONO**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão do Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: MSc. Marcelo dos Santos Barretos

Lajeado, junho de 2018.

Fredi Guth

**DESENVOLVIMENTO DE UM TUBO
COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO COM FIBRA DE
CARBONO**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica:

Prof. MSc. Marcelo dos Santos Barretos –
Orientador

Universidade do Vale do Taquari

Prof. Dr. Ricson Rocha de Souza

Universidade do Vale do Taquari

Prof. Dr. Lober Hermany

Universidade do Vale do Taquari

Lajeado, junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho de conclusão de curso envolveu inúmeras pessoas que, de uma forma ou de outra, auxiliaram em algum momento, indiretamente ou diretamente, cabe aqui um sentimento de gratidão por mais uma conquista.

Primeiramente quero agradecer a minha esposa que sempre me auxiliou e esteve disposta a dedicar o tempo que muitas vezes não tinha, na realização deste trabalho. O seu incentivo e paciência foi um algo a mais para o sucesso na realização de mais este sonho.

Agradeço a todos os professores do Curso de Engenharia Mecânica da UNIVATES, ao Coordenador de Curso e, no caso especial, ao professor Marcelo dos Santos Barretos, por estar sempre disponível em ajudar-me e por empenhar-se na orientação deste trabalho.

Agradeço aos monitores do Lapol (UFRGS), em especial aos alunos de mestrado em engenharia mecânica Cristiano Baierle por me auxiliar nas simulações e Frederico Eggers, por me ajudar na confecção dos tubos de compósito para o presente estudo, e também ao Professor Dr. Sandro Amico, coordenador do laboratório por disponibilizar a utilização dos seus equipamentos.

Aos colegas de engenharia mecânica Robson Cargnelutti e Izaqueu Maciel Gonçalves que ajudar a desenvolver o dispositivo para testes hidrostáticos.

RESUMO

Um material compósito significa que dois ou mais materiais são combinados em uma escala macroscópica para formar um terceiro material útil. As fibras de carbono são o reforço predominante de alta resistência e alto módulo utilizado na fabricação de compósitos poliméricos de alto desempenho. O método de enrolamento filamentar é uma técnica utilizada para a fabricação de superfícies de revolução, como tubos cilíndricos. Os tubos de fibras reforçadas por polímeros produzidos em material compósito foram fabricados por enrolamento de filamentos seco, submetidos aos testes internos de pressão para avaliação de análises computacionais e testes hidrostáticos com os corpos de provas. Com o resultado do estudo, a utilização de tubos de compósito reforçados com fibras de carbono para aplicações com pressões até 12 kgf/cm² foi validado, tanto análises analíticas, cujos resultados de tensão máxima atingiram 85 kgf/cm², estruturais obteve-se 80,75 kgf/cm² e para os testes hidrostáticos, 64,24 kgf/cm², pois suportou pressões maiores, sendo que este possui menores espessuras de paredes e sua massa é muito menor que os demais tubos comerciais.

Palavras-chave: Compósito, Fibras de carbono, Enrolamento filamentar, Fibras reforçadas por polímeros.

ABSTRACT

A composite material means that two or more materials are combined on a macroscopic scale to form a third useful material. Carbon fibers are the predominant high strength and high modulus reinforcement used in the manufacture of high performance polymer composites. The filament winding method is a technique used for manufacturing surfaces of revolution, such as cylindrical tubes. The composite polymer reinforced fiber tubes were fabricated by dry filament winding, subjected to internal pressure tests for evaluation of computational analyzes and hydrostatic tests with the test bodies. With the result of the study, the use of composite tubes reinforced with carbon fibers for applications with pressures up to 12 kgf/cm² was validated, both analytical analyzes, whose results of maximum tension reached 85 kgf/cm², structural obtained 80.75 kgf/cm² and for the hydrostatic tests, 64.24 kgf/cm², because it has withstand higher pressures, which has lower wall thicknesses and its mass is much lower than the other commercial pipes.

Keywords: Composite, Carbon fibers, Filament winding, Polymer reinforced fibers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de classificação para materiais compósito.....	28
Figura 2 – Bobinas de Fibra de carbono	36
Figura 3 - Faixas de temperatura nas quais os compósitos com diferentes tipos de matrizes podem ser usados	39
Figura 4 - Temperaturas de transição.	43
Figura 5 - Esquema do processo produtivo de uma máquina de enrolamento de filamentos.....	52
Figura 6 - Ilustração de um ciclo de enrolamento sobre superfície cilíndrica.	53
Figura 7 - Largura da banda em uma estrutura fabricada por processo de enrolamento filamentar.....	53
Figura 8 - Enrolamentos polar (a), helicoidal (b) e circunferencial (c).	55
Figura 9 - Exemplos de peças pultrusadas	56
Figura 10 - Processo de pultrusão	57
Figura 11 - Diagrama esquemático ilustrando a produção de fita prepreg usando polímeros termofixos	59
Figura 12 - Esquema de análise de compósitos laminados	60
Figura 13 - Ilustração material (a) Isotrópico, (b) Ortotrópico e (C) Anisotrópico	62
Figura 14 - Questionamentos antes da execução do projeto	63
Figura 15 - Básico questionamento de micromecânica.....	63
Figura 16 - Lâmina direção longitudinal e transversal	64
Figura 17 - Planos de ortotropia	65
Figura 18 - Carga de tração e cisalhamento em um compósito de fibra contínuo unidirecional.	67
Figura 19 - Representação de uma lâmina unidirecional carregada longitudinalmente	70
Figura 20 - Curvas tensão-deformação da fibra e da matriz para $E_f < E_m$	71

Figura 21 - Variação da tensão de ruptura de uma lâmina unidirecional σ_1 com V_f para $E_f < E_m$	72
Figura 22 - Representação de uma lâmina unidirecional carregada transversalmente	73
Figura 23 - Representação de uma lâmina unidirecional carregada sob tensão de cisalhamento	75
Figura 24 - Determinação do coeficiente de Poisson	77
Figura 25 - Feixe prismático seção transversal A.....	79
Figura 26 - Feixe prismático seção transversal A.....	79
Figura 27 - Feixe prismático sob carga combinada.....	80
Figura 28 - Placa sob cisalhamento no plano.....	81
Figura 29 - Modelos estratificados (a) Laminado, (b) variação de deformação e (c) variação de tensão	83
Figura 30 - Tensões em cada lâmina.	84
Figura 31 - Envelope com falha para tensão de cisalhamento constante usando a teoria de falha tensão máxima.	96
Figura 32 - Seqüência de etapas para aplicação do Método de Elementos Finitos (MEF)	100
Figura 33 - Detalhe de um modelo de elementos finitos.	101
Figura 34 - Seção de um vaso cilíndrico pressurizado internamente.	102
Figura 35 - Representação das tensões atuantes em uma tubulação	104
Figura 36 - Instalação de módulos de tubos para indústria de petróleo.	105
Figura 37 - Fluxograma representando a metodologia adotada no trabalho.....	108
Figura 38 - <i>Towpreg</i> de carbono/epóxi no formato de <i>Roving</i>	110
Figura 39 - Recipiente de pressão compósito de fibra.	115
Figura 40 - Fluxograma representando a metodologia do desenvolvimento do enrolado no <i>software</i> Cadwind	121
Figura 41 - Dados de entrada do mandril.....	122
Figura 42 - Dados de entrada do material.....	122
Figura 43 - Dados de entrada do enrolamento.....	123

Figura 44 - Simulações CAM no <i>software CADWind</i> para programação dos enrolamentos filamentos: (a) simulação de enrolamento 45°, (b) simulação de enrolamento 55°, (c) simulação de variação de ângulo de enrolamento	123
Figura 45 - Projeto do mandril utilizado para fabricação dos cilindros.	124
Figura 46 - (a) Detalhe da rosca interna M12, (b) Detalhe da rosca externa M12, (c) detalhe do rebaixo nas extremidades.....	125
Figura 47 - Tubo enrolado sobre o mandril bi-partido	125
Figura 48 - Equipamento de Enrolamento Filamentar MF Tech (a) alimentadores da fibra (b)	126
Figura 49 - Estufa para cura.....	127
Figura 50 - Equipamento de corte TR 231 da marca Clipper com disco diamantado.	127
Figura 51 - Fluxograma das etapas básicas para obtenção do amostral	128
Figura 52 - Tubos produzidos por enrolamento filamentos, (a) tubo 1, (b) tubo 2. ..	129
Figura 53 - (a),(b) Protótipo para testes hidrostáticos em tubos de baixa pressão .	130
Figura 54 - Dispositivo para ensaios hidrostáticos	131
Figura 55 - Detalhe da cabeça de vedação.....	131
Figura 56 - (a) Tanque pressurizado para imersão em água fechado, (b) tanque de imersão aberto, (c) dispositivo fixo na tampa para imersão em água	132
Figura 57 - Disposição das camadas 1 e 2 do laminado	135
Figura 58 - Gráfico do envelope de falhas dos dois critérios.....	140
Figura 59 - Geometria do tubo	141
Figura 60 - Gráfico do critério tensão máxima – tensão x camada	143
Figura 61 - Gráfico do critério tensão máxima – deformação x camada	144
Figura 62 - Gráfico do critério <i>Tsai-Hill</i> – tensão x camada.....	144
Figura 63 - Gráfico do critério <i>Tsai-Hill</i> – deformação x camada.....	145
Figura 64 - Falha na primeira camada – critério tensão máxima.....	146
Figura 65 - Falha na primeira camada – critério <i>Tsai-Hill</i>	147
Figura 66 - Gráfico falha progressiva – critério <i>Tsai-Hill</i> na direção X.....	148
Figura 67 - Gráfico falha progressiva – critério <i>Tsai-Hill</i> na direção Y.....	149
Figura 68 - Gráfico falha progressiva – critério tensão máxima na direção X	150
Figura 69 - Gráfico falha progressiva – critério tensão máxima na direção Y	151

Figura 70 - Gráfico de convergência de malhas - máxima pressão x número de elementos.....	153
Figura 71 - Condições de contorno e pressões internas.	153
Figura 72 - Tubo modelado para simulação no software.	154
Figura 73 - Tubo com condições de contorno e indicações de pressões internas ..	154
Figura 74 - Tensão do tubo para S11.....	155
Figura 75 - Tensão do tubo para S22.....	155
Figura 76 - Detalhe ampliado da tensão do tubo para S11.	156
Figura 77 - Gráfico pressão máxima x deslocamento	157
Figura 78 - Teste com baixa pressão.	158
Figura 79 - Teste com alta pressão.....	159
Figura 80 - Dispositivo com o tubo após o teste hidrostático.	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades dos materiais compósitos.....	30
Tabela 2 - Propriedades de estruturas convencionais e bidirecionais para materiais compósitos	32
Tabela 3 - Propriedades típicos de cada classe de fibras de carbono.	35
Tabela 4 - Propriedades representativas das fibras de Kevlar	37
Tabela 5 - Comparação das faixas típicas de valores das propriedades das resinas	41
Tabela 6 - Influência de variáveis externas nas propriedades.	42
Tabela 7 - Temperaturas de transição (T_g e T_m).	44
Tabela 8 - Propriedades típicas dos poliésteres termorígidos.....	46
Tabela 9 - Propriedades típicas da resina epóxi moldada (até 23°C).	47
Tabela 10 - Propriedades do material da Fibra T700S.....	109
Tabela 11 - Propriedades do material da resina epóxi UF3369	110
Tabela 12- Propriedades típicas da fibra (Sistema de Unidades SI)	112
Tabela 13 - Propriedades típicas da matriz (Sistema de Unidades SI)	112
Tabela 14 - Propriedades Típicas de uma Lâmina Unidirecional (Sistema de Unidades SI).....	113
Tabela 15 - Propriedades de material representativo usadas como entrada nos modelos numéricos	114
Tabela 16 - Descrição dos tubos fabricados por enrolamento filamentar.....	129
Tabela 17 - Dados do compósito para simulação estrutural	133
Tabela 18 - Disposição do laminado	134
Tabela 19 - Propriedades do laminado 2D e 3D	135
Tabela 20 - Valores da matriz Q-Barra nas camadas do laminado	136
Tabela 21 - Valores da matriz ABD nas camadas do laminado	137
Tabela 22 - Valores da matriz ABD inversa nas camadas do laminado	137

Tabela 23 - Critério de falha em potencial da lâmina	138
Tabela 24 - Propriedades da seção conforme Heliuss Composite 2017.....	141
Tabela 25 - Critérios de tensão máxima - deformação e tensão na localização das camadas.....	142
Tabela 26 - Critérios de <i>Tsai-Hill</i> – deformação e tensão na localização das camadas	143
Tabela 27 - Falha progressiva – Critério <i>Tsai-Hill</i>	148
Tabela 28 - Falha progressiva – critério tensão máxima	150
Tabela 29 - Convergência de malhas para máxima pressão	152
Tabela 30 - Valores das análises dos estudos	160
Tabela 31 - Tubo Schedule NBR-5590.	161
Tabela 32 - Tubo comercial ASTM A36	161
Tabela 33 - Tubo compósito.....	162
Tabela 34 - Tubo compósito x aço comercial (Pressão Teste).....	162
Tabela 35 - Tubo compósito x aço comercial (Peso)	163

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

δ	Parâmetro que controla o enrolamento geodésico
σ	Tensão (Pa)
E	Módulo de Young (Pa)
ν	Coeficiente de Poisson
ε_i	Deformação na direção i
E_i	Módulo de Young na direção i (Pa)
ε_{xx}	Deformação na direção axial
G_{ij}	Módulos de corte (Pa)
V_f	Fração volumétrica de fibra
K_f	Módulo volumétrico da fibra
G_f	Módulo de cisalhamento da fibra
K_m	Módulo volumétrico da matriz
G_m	Módulo de cisalhamento da matriz
A_{mn}	Componentes da matriz de rigidez extensional A
B_{mn}	Componentes da matriz de acoplamento B
D_{mn}	Componentes da matriz de rigidez à flexão e torção D
σ_{11}	Tensão equivalente na direção da fibra
σ_{22}	Tensão equivalente transversalmente à fibra

K_{xy} Curvaturas do meio plano

η Número de filamentos
 ν_{12} Coeficiente de Poisson principal
 ν_{21} Coeficiente de Poisson secundário
 τ_{xy} Tensão de cisalhamento no plano x-y
 σ_x Tensão normal na direção axial
 σ_y Tensão normal na direção radial
 σ_z Tensão normal na direção circunferencial
 τ_{xz} Tensão de cisalhamento transversal no plano x-z
 τ_{yz} Tensão de cisalhamento no plano y-z
 ρ Densidade
 γ_{xy}^0 Deformação angular referente à tensão de cisalhamento no plano
 ε_0 Módulo elástico inicial
 ε_{11} Deformação na direção longitudinal à fibra
 ε_{22} Deformação na direção transversal da lâmina
 ε_{33} Deformação da lâmina transversal ao plano da lâmina
 E_x^0 Deformação angular referente à tensão de tração
 E_y^0 Deformação angular referente à tensão de compressão
 E_{22} Módulo elástico inicial
 E_1 Módulo de elasticidade longitudinal
 E_2 Módulo de elasticidade transversal
 G_{12} Módulo de cisalhamento no plano 1-2
 G_{13} Módulo de cisalhamento transversal no plano 1-3
 G_{23} Módulo de cisalhamento transversal no plano 2-3
 M_{xy} Momentos fletores e torçores resultantes
 N_{xy} Resultantes de tensões normais e de cisalhamento

Q Resistência ao cisalhamento transversal x-z

R Resistência ao cisalhamento transversal no plano y-z

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Definição do problema.....	20
1.2 Justificativa do trabalho	21
1.3 Objetivos	21
1.3.1 Objetivos específicos.....	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 Compósitos.....	23
2.1.1 Definição	23
2.2 Características.....	24
2.3 Aplicações dos compósitos	26
2.4 Vantagens e desvantagens da utilização dos compósitos.....	26
2.5 Classificação dos compósitos	27
2.6 Estrutura micromecânica dos compósitos	29
2.6.1 Compósitos reforçados com fibras	29
2.6.2 Aplicação das fibras de compósitos	31
2.7 Fibras de vidro.....	33
2.8 Fibras de carbono e grafite	33
2.9 Fibras de aramida.....	36
2.10 Materiais das matrizes	38
2.11 Polímeros termorígidos e termoplásticos.....	40
2.11.1 A importância da propriedade dos polímeros para os compósitos.....	41
2.11.1.1 Materiais comuns de matriz polimérica.....	44
2.11.1.2 Resina de poliéster.....	45
2.11.1.3 Resina epóxi	46
2.12 Fabricação de compósitos	48

2.13 Fabricação de compósitos de matriz de resina termorígida	48
2.13.1 Enrolamento de filamentos	50
2.13.2 Tipos de enrolamento	54
2.14 Pultrusão.....	55
2.15 Pré-impregnados	57
2.16 Análise mecânica de uma estrutura	59
2.17 Micromecânica de uma lâmina.....	62
2.17.1 Regra da mistura	64
2.17.2 Frações de volume e massa, densidade e conteúdo vazio	68
2.17.3 Módulo de elasticidade na direção longitudinal	69
2.17.4 Módulo de elasticidade na direção transversal	73
2.17.5 Módulos de cisalhamento.....	74
2.17.6 Coeficientes de Poisson	76
2.18 Análise macromecânica dos laminados.....	78
2.18.1 Tensão – Deformação para uma viga isotrópica	78
2.18.2 Equações de deslocamento de tensão para um laminado anisotrópico.....	80
2.18.3 Tensão - Deformação no laminado	82
2.18.4 Força e momento resultante	83
2.18.5 Análise de um laminado compósito	87
2.18.6 Casos especiais de laminados.....	88
2.18.7 Conformidades dos laminados	90
2.18.8 Constantes de engenharia para um laminado multi-axial	91
2.19 Envelope de Falhas	93
2.20 Critérios de falha	93
2.20.1 Tensão máxima	94
2.20.2 Máxima deformação	96
2.20.3 Critério de <i>Tsai-Hill</i>	97
2.21 Soluções numéricas.....	98
2.21.1 Método dos elementos finitos	98
2.22 Vasos de pressão cilíndricos	101
2.23 Ensaio hidrostático de pressão interna	103
2.24 Tubos de materiais compósitos e suas aplicações	104
3 MATERIAIS E MÉTODOS	107

3.1 Materiais.....	108
3.1.1 Matriz polimérica	109
3.1.2 Reforço.....	110
3.1.3 Desmoldante.....	111
3.2 Métodos.....	111
3.2.1 Método analítico	111
3.2.1.1 Micromecânica	111
3.2.1.2 Macromecânica	113
3.2.2 Método estrutural	113
3.2.3 Método de cálculos	115
3.2.3.1 Dados para os cálculos de entrada	115
3.2.3.1.1 Dados de entrada	116
3.2.3.1.2 Massa para cada camada	118
3.2.3.1.3 Densidade da lâmina.....	119
3.2.4 Programação de enrolamento.....	120
3.2.5 Produção do mandril.....	124
3.2.6 Descrição do equipamento de enrolamento filamentar	125
3.2.6 Processo de cura e corte.....	126
3.2.7 Fabricação dos tubos	127
3.2.8 Ensaio hidrostáticos de pressão interna	129
4 RESULTADO E DISCUSSÕES	133
4.1 Micromecânica	133
4.2 Análise macromecânica do laminado – tubo circunferencial	134
4.3 Resultados da análise de falha potencial na lâmina	138
4.4 Resultados da análise do envelope de falhas	139
4.5 Resultados da análise estrutural do tubo	140
4.6 Falha na primeira camada	146
4.7 Indicativo de Pressão Máxima Suportada.....	147
4.8 Análise da simulação estrutural	152
4.9 Análise teste hidrostático de pressão interna	157
4.10 Análise comparativa entre os métodos utilizados	160
4.11 Análise comparativo tubo aço comercial x compósito.....	160
5 CONCLUSÕES	164

5.1 Sugestões futuras	166
REFERÊNCIAS.....	167

1 INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, há a necessidade de materiais com uma combinação de propriedades que não são encontradas nas ligas metálicas convencionais, cerâmicas ou poliméricas. Devido a esta dificuldade, houve a necessidade de desenvolver sistemas compósitos (combinação entre dois ou mais materiais com propriedades distintas), principalmente quando são mencionados os casos de materiais que precisam ser utilizados no setor de transportes e também na área da aeronáutica, tais como, a necessidade de maior resistência a impactos, baixa densidade, elevada capacidade de rigidez, grande resistência a corrosões e fadiga. Para o caso específico dos compósitos, que são constituídos por duas fases, matriz e reforço, tem como finalidade, garantir tenacidade, com grande resistência a fadiga e à corrosão em um material compósito.

Os compósitos não são de origem recente, por exemplo, antigamente os israelitas usavam tijolos feitos de argila e reforçados com palha é o primeiro exemplo da aplicação de compósitos. Os constituintes individuais, argila e palha, sozinhos não tinham função nenhuma, mas sim quando montados. Alguns acreditam que a palha foi usada para evitar que a argila se quebrasse, porém outros sugerem que ela amaldiçoou as fissuras afiadas na argila seca. Exemplos históricos de compósitos são abundantes na literatura. Exemplos significativos incluem o uso de paredes de lama de reforço em casas com brotos de bambu, madeira laminada colada por egípcios (1500 aC) e laminados de metais forjados na fabricação de espadas (A.D. 1800). No século XX, os compósitos foram usados na década de 1930 quando as fibras de vidro reforçavam as resinas. Desde a década de 1970, a aplicação de compósitos aumentou amplamente devido ao desenvolvimento de novas fibras como o carbono, o boro e as aramidas, dentre outros novos sistemas compostos com matrizes de metais e cerâmicas (KAW, 2006). Na década de 70, a indústria de compósitos começou a tomar forma, foram desenvolvidas melhores resinas plásticas e fibras de reforço com perceptíveis melhorias. A DuPont desenvolveu uma fibra de

aramida conhecida como Kevlar, que se tornou o produto de escolha em armaduras, devido à sua alta resistência à tração, alta densidade e peso leve. A fibra de carbono também foi desenvolvida nessa mesma época. Todas estas novas tecnologias desenvolvidas em torno das fibras, faz com que cada vez mais, as peças anteriormente feitas de aço, possam facilmente ser substituídas (JOHNSON, 2017, texto digital)

Para Vanderplaats (1984), um determinado projeto convencional pode ser obtido mediante processo de tentativa e erro, mas quando aplicado ao projeto de um compósito laminado, estes processos podem se tornar dispendiosos, devido as grandes quantidades de variáveis que são envolvidas durante todo o processo. Por isso, a melhor maneira para o projeto de elementos de material compósito, pode ser obtida utilizando uma busca racional, com base nas ferramentas de otimizações de processo.

Segundo Telles (1996), o transporte dos fluidos que são realizados em dutos e tubulações são de extrema importância para o desenvolvimento econômico. O custo de um sistema que envolve tubulações pode ser considerado relevante, pois em média, representa um total de 20% do projeto que é designado para planta industrial.

Johnson et al. (2000); Meniconi et al. (2001) descrevem que os avanços científicos propiciaram o surgimento de inúmeros materiais avançados, tais como compósitos, que tem a sua utilização em vários setores industriais, como por exemplo, indústrias automotivas e petrolíferas. Nesta nova geração de materiais avançados, o material que tem, já há algum tempo um maior destaque, são os compósitos reforçados por fibras, por apresentarem elevadas relações resistência/peso e rigidez/peso. O seu grande desempenho mecânico tem impulsionado cada vez mais o seu emprego na confecção de tubos industriais que são submetidos a alta pressão e também a condições ambientais desfavoráveis.

Conforme Azarafza et al. (2009), o desenvolvimento dos tubos metálicos é baseado na determinação de somente uma variável de projeto, a espessura, porém podem ser duas variáveis quando for considerada a escolha do material. Contudo, o

projeto de estruturas de compósitos laminados pode-se tornar mais complicado por envolver, não somente a seleção dos constituintes do material compósito (fibra e matriz), mas também a definição das quantidades de lâminas, as orientações das fibras e as espessuras de cada lâmina.

Barbosa et. al. (2016), compósitos de polímero reforçado por fibra de carbono (CFRP) vem surgindo como os materiais de escolha em vários tipos de estruturas aeronáuticas, devido à sua combinação de propriedades, na qual incluem a alta resistência e relação módulo/peso, à corrosão. Com a aplicação cada vez maior desses materiais, as influências nas condições de serviço ambiental sobre sua durabilidade, passou a ser uma preocupação constante para a indústria aeronáutica e companhias aéreas. Estas estruturas devem necessariamente serem projetadas para aguentar as condições mais severas de operação, que são impostas durante a vida útil do componente estrutural.

Nesse trabalho, é proposto uma validação dos dados computacionais de um tubo compósito revestido por fibra de carbono através do processo de fabricação de enrolamento filamentar com a utilização de um *software* para a realização dos cálculos dos modelos matemáticos.

1.1 Definição do problema

Devido ao fato de ainda não existir um conceito definitivo de materiais compósitos que pode ser aceito completamente, faz com que várias definições sejam apresentadas. Uma delas por exemplo, que os materiais compósitos são composto por duas fases: uma matriz e um reforço, e que podem ser ambas de natureza cerâmica, metálica ou polimérica. Porém com esta definição ainda surge a possibilidade para ser definida, como qualquer material que seja composto por mais de dois elementos químicos como um compósito, podendo até ser considerada nesta situação uma simples liga de aço-carbono como um compósito. A ideia principal é tentar focar o trabalho na matriz polimérica e clarear um pouco os conceitos que circundam este assunto, que está em voga nos dias atuais, como

umas das tecnologias com elevado potencial de crescimento no setor industrial e aeronáutico.

1.2 Justificativa do trabalho

A motivação que levou ao desenvolvimento do presente trabalho empregando compósitos poliméricos de fibra de carbono de parede fina, foi a limitação encontrada na utilização do aço na forma de estruturas cilíndricas, que, em determinadas aplicações, requerem elevada capacidade do material de suportar pressões internas, considerando-se aspectos de resistência mecânica e peso. Em função destas condições, a construção de uma estrutura cilíndrica que atendesse a estes dois principais requisitos, exigiu um completo desenvolvimento do material. Outra justificativa foi o fato de que materiais compósitos ainda são bastante desconhecidos para muitos e também por ser um assunto muito desafiador, onde poucas pessoas possuem domínio na área, devido ao fato de ser ainda muito recente os estudos desenvolvidos em fibras reforçadas por polímeros.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo apresentar a metodologia que compare a análise macromecânica, simulação computacional e teste experimental, validando o desenvolvimento realizado em tubo de parede fina de um material compósito fabricado por enrolamento filamentar.

1.3.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos para esse trabalho são os seguintes tópicos:

- Analisar as estruturas em nível de micromecânica e macromecânica dos materiais compósitos;

- Pré-dimensionamento baseado em soluções analíticas simplificadas de materiais compósitos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Compósitos

2.1.1 Definição

Conforme Kaw (2006), compósito é considerado um material estrutural, na qual consiste de dois ou mais constituintes, que podem ser combinados em um nível macroscópico e não são solúveis entre si. Um componente é chamado de fase de reforço, este pode ser aquele que se incorporado é chamado de matriz. O material da fase de reforço pode ser sob a forma de fibras ou partículas, estes por sua vez são geralmente contínuos.

Segundo Jones (1999), a palavra compósito no termo material compósito significa que dois ou mais materiais são combinados em uma escala macroscópica para formar um terceiro material útil. O elemento principal é o exame macroscópico de um material em que os componentes podem ser identificados a olho nu. Diferentes materiais podem ser combinados numa escala microscópica, tal como na liga de metais, mas o material resultante é, para todos os fins práticos, macroscopicamente homogêneo, ou seja, os componentes não podem ser distinguidos a olho nu e essencialmente agem juntos.

Para Agarwal (1999) a palavra "compósito" significa "consistindo duas ou mais partes distintas". Por isso, um material com dois ou mais materiais ou fases constituintes distintos pode ser considerado um material compósito. Porém, são reconhecidos materiais como compósitos somente quando as fases constituintes têm características físicas significativamente diferentes, nas quais suas propriedades compostas são visivelmente diferentes das demais de seus constituintes. Em se tratando dos metais, as fases constituintes têm frequentemente propriedades quase idênticas (por exemplo, módulo de elasticidade), nas quais estas geralmente não são de caráter fibroso, e uma das fases normalmente está presente em frações de pequeno volume. As ligas metálicas de duas fases são bons exemplos de

compósitos em partículas para termos de estrutura, todavia os plásticos que são preenchidos para fins de custo, contêm pequenas quantidades de aditivos.

2.2 Características

Segundo Agarwal (1999), os compósitos consistem em uma ou mais fases descontínuas incorporadas em uma fase contínua. A fase descontínua é geralmente mais dura e maior do que a fase contínua e é chamada de material de reforço ou reforço, enquanto a fase contínua é denominada matriz. A exceção mais notável desta regra é a classe de materiais conhecida como polímero modificado com borracha, na qual é constituída por uma matriz de polímero rígida preenchida com partículas de borracha.

Muitos polímeros reforçados com fibra oferecem uma combinação de força e módulo que são comparáveis ou melhores do que muitos materiais metálicos tradicionais. Devido à sua baixa densidade, as relações peso-força e módulo de peso, as proporções destes materiais compósitos são muito superiores às de materiais metálicos. Além disso, a resistência à fadiga, bem como a tolerância ao desgaste de muitos laminados compósitos são excelentes. Por estas razões, os polímeros reforçados com fibra emergiram como uma classe importante de materiais estruturais e são considerados para uso como substituição de metais em muitos componentes de peso crítico nas indústrias aeroespacial, automotiva e outras (MALLICK, 2007).

As propriedades dos compósitos são principalmente influenciadas pelas propriedades dos materiais constituintes, sua distribuição e a interação entre eles. As propriedades compostas podem ser a soma da fração volumétrica das propriedades dos constituintes, ou os constituintes podem interagir de forma sinérgica, de modo que fornecem propriedades no compósito que não são explicadas por uma simples soma da fração de volume das propriedades dos constituintes. Assim, ao descrever um material compósito como um sistema, além de especificar a matéria constituinte e suas propriedades, é necessário especificar a geometria do reforço com referência ao sistema. A geometria do reforço pode ser

descrita pela forma, distribuição e tamanho da distribuição. Porém, os sistemas que contêm reforços com geometria idêntica podem diferir uns dos outros de várias maneiras, por exemplo, o reforço. Nos sistemas podem diferir em concentração, distribuição de concentração e orientação. Portanto, todos esses fatores podem ser importantes para determinar as propriedades dos compósitos, mas raramente são todos considerados no desenvolvimento da descrição teórica dos compósitos (AGARWAL, 1999).

Conforme Kaw (2006), os fatores de fibra contribuem para o desempenho mecânico de um compósito, podem ser dispostos pelo comprimento, na qual as fibras podem ser longas ou curtas. As fibras longas e contínuas são fáceis de orientar e processar, mas fibras curtas não podem ser totalmente controladas para uma orientação adequada. As fibras longas possibilitam mais benefícios em relação às curtas, tais como, a resistência ao impacto, um pequeno encolhimento, melhorias no acabamento superficial, porém as fibras curtas possuem baixo custo, são fáceis de ser trabalhadas e tem fabricação de tempo de ciclo rápido. Quanto a sua orientação, fibras orientadas em uma direção fornecem rigidez e força mais elevadas. Porém se as fibras estiverem orientadas em mais de uma direção, ocorrerá alta rigidez e força nas direções das orientações das fibras. Na disposição da forma, a mais comum de fibras é a circular, pois é de fácil manuseio e fabricação. Hexágono e quadril são possíveis, mas suas vantagens de força e fatores de embalagem elevados não superam a dificuldade em manipulá-la e processá-la, pois o material influencia diretamente a mecânica do desempenho de um compósito. Normalmente, espera-se que as fibras tenham elevados módulos elásticos, esta expectativa de custo têm fatores essenciais para a grafite, aramida e vidro, estas dominam mercado de fibras para compósitos.

2.3 Aplicações dos compósitos

Os materiais compósitos podem ser aplicados em diversas áreas e setores, tais como:

- Na indústria automobilística: utilização em painéis, nos encaixes para os faróis, construção de pára-choques, em carrocerias, etc.
- Na indústria aeronáutica: hélices para helicópteros, aeronaves, trens de pouso, etc.
- Na indústria náutica: casco para barcos, mastros, bóias utilizadas para sinalização, etc.
- Na área química: tubulações, tanques para altas pressões, embalagens para armazenar produtos corrosivos, etc.
- No setor elétrico: suportes para cabos elétricos, chaves de comando, postes utilizados para altas tensões, etc.
- No setor de materiais esportivos: itens para piscinas, tacos para golfe, raquetes para tênis, etc.
- Na área da medicina: prótese, adesivos, fios, etc.

2.4 Vantagens e desvantagens da utilização dos compósitos

Para Jones (1999), as vantagens dos materiais compósitos são que, se bem projetado, normalmente exibem as melhores qualidades de seus componentes ou constituintes e muitas vezes algumas qualidades que nenhum dos constituintes pode possuir. Podem ser citadas algumas das propriedades que podem ser melhoradas formando um material compósito, tais como: aumento do comportamento de força, resistência à fadiga, melhoria na rigidez, maior resistência à corrosão, peso e resistência ao desgaste.

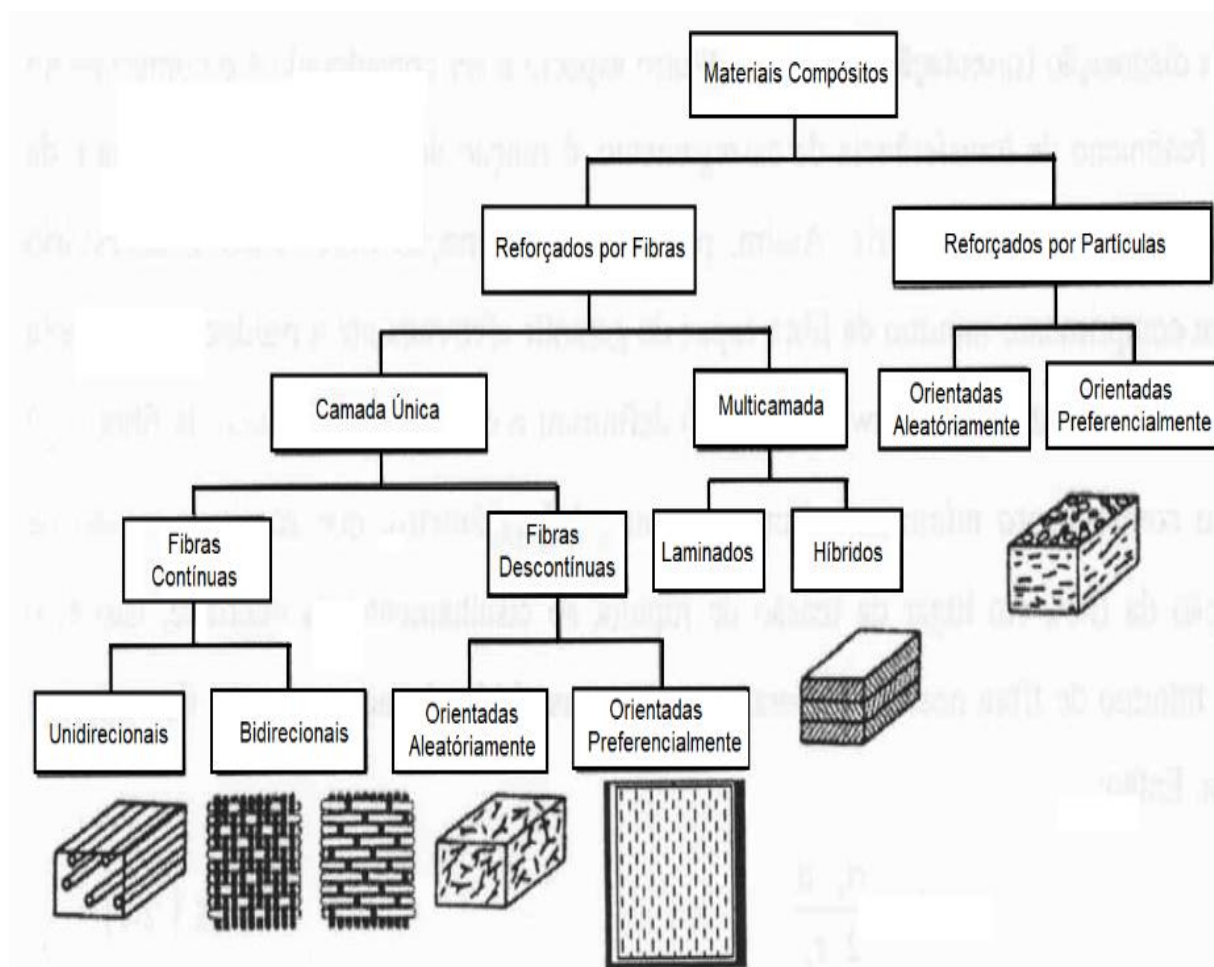
Conforme Kaw (2006), a maior desvantagem dos compósitos geralmente é o alto custo de fabricação de compósitos. Por exemplo, uma parte composta de grafite

/ epóxi pode custar até 10 a 15 vezes o custo do material, mas com as melhorias nas técnicas de processamento e fabricação, estes custos serão reduzidos no futuro. A caracterização mecânica de uma estrutura composta é mais complexado que a de uma estrutura metálica. Ao contrário dos metais, materiais compósitos não são isotrópicos, ou seja, suas propriedades não são as mesmas em todas direções.

2.5 Classificação dos compósitos

Para Agarwal (1999), a maioria dos materiais compósitos desenvolvidos até agora foram fabricados para melhorar as propriedades mecânicas, tais como resistência, rigidez, dureza e altas temperaturas. É natural estudar ambos os compósitos que possuem um mecanismo de resistência comum, dependendo basicamente da geometria do reforço. Portanto, é muito conveniente classificar materiais compósitos com base na geometria de uma unidade representativa de reforço. A Figura 1 representa um esquema de classificação para materiais compósitos.

Figura 1 - Esquema de classificação para materiais compósito



Fonte: Tita (2007, p.9).

Com relação a essa classificação, a característica distintiva de uma partícula é de natureza não fibrosa. Uma fibra é caracterizada pelo fato de seu comprimento ser muito maior do que suas dimensões transversais e os compósitos reforçados com fibras são, compreensivelmente, chamados de compósitos fibrosos (TITA, 2007).

2.6 Estrutura micromecânica dos compósitos

2.6.1 Compósitos reforçados com fibras

De acordo com Agarwal (1999), sabe-se que as forças medidas da maioria dos materiais são muito menores (por um par de ordens de grandeza) do que o seu teor de resistência. A esta discrepância em valores, acredita-se que seja devido à presença de imperfeições ou falhas inerentes ao material. Falhas na forma de rachaduras que se encontram perpendiculares à direção das cargas aplicadas são particularmente prejudiciais, por isso, em comparação com a resistência do material a granel, filamentos artificiais ou fibras de materiais não poliméricos, podem exibir maiores resistências ao longo de seus comprimentos, pois grandes falhas que podem estar presentes no material a granel são minimizadas devido ao pequeno corte transversal nas dimensões da fibra. No caso de materiais poliméricos, a orientação da estrutura molecular é responsável por alta resistência e rigidez. Propriedades de alguns tipos comuns de fibras, bem como alguns convencionais, os materiais são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Propriedades dos materiais compósitos

Fibra	Diâmetro (μm)	Densidade (g/cm^3)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Tração (GPa)	Alongamento na Ruptura (%)	Coefficiente de Poisson
Vidro						
Tipo E aplicações comuns	8 - 14	2,54	73	3,45	4,4	0,22
Tipo S alto desempenho	10	2,49	86	4,5	5,3	0,22
Carbono						
T300 alta rigidez	6,5	1,76	230	3,1	1,5	0,2
AS2 alta rigidez	-	1,8	227	2,756	1,3	-
AS4 alta rigidez	7	1,81	235	3,7	1,6	-
IM6 módulo intermediário	4	1,8	275,6	4,5	1,73	-
HMS4 módulo alto	-	1,8	317	2,343	0,8	-
UHM módulo ultra-alto	-	1,85	441	3,445	0,8	-
M50 módulo ultra-alto	-	1,91	490	2,45	0,5	-
Aramida						
Kevlar 49	12	1,45	131	3,8	2,8	0,35
Kevlar 149	12	1,45	186	3,4	1,9	-
Boro	140	2,5	395	3,45	0,79	0,2
Carboneto de Silício						
SCS-6	-	3	427	2,4 - 4	0,6	0,2
Alumina						
Nextel 610	-	3,75	370	1,9	-	-
Nextel 720	-	3,4	260	2,1	-	-

Fonte: Daniel Ishai, 2006 e Barbero 1999. Adaptado pelo autor.

Conforme Mallick (2007), as fibras são os constituintes principais em um material compósito reforçado com fibra. Eles ocupam a maior fração de volume em um laminado compósito e compartilham a maior parte da carga atuando sobre uma estrutura compósita. A seleção adequada do tipo de fibra, fração de volume de fibra, comprimento de fibra e orientação de fibra é muito importante, pois influencia as seguintes características de um laminado compósito conforme:

1. Densidade;

2. Resistência e módulo de tração;
3. Força de compressão e módulo;
4. Força de fadiga, bem como mecanismos de falha de fadiga;
5. Condutividades elétricas e térmicas;
6. Custo.

2.6.2 Aplicação das fibras de compósitos

As duas características excepcionais dos compósitos de fibra orientada são a sua alta relação peso-força e anisotropia controlada. A resistência e o módulo de compósitos bidirecionais de uso comum, são comparados com os materiais estruturais convencionais na Tabela 1. Uma vez que os metais policristalinos têm propriedades iguais em todas as direções, para uma comparação, as propriedades laminadas bidirecionais (por exemplo, cross-ply) são usadas na Tabela 2. Os laminados bidirecionais têm forças e modulam aproximadamente metade daqueles dos laminados unidirecionais, possuem propriedades iguais em duas direções principais e mostram menor variação da propriedade com direção. Os compósitos de fibra geralmente são superiores aos metais em relação à resistência e módulo específicos, porém, os de fibra de vidro são inferiores ao aço e ao alumínio em relação ao módulo específico (AGARWAL, 1999).

Tabela 2 - Propriedades de estruturas convencionais e bidirecionais para materiais compósitos

Material	Fibra Volume Fração (V_f) (%)	Módulo de Tensão (E) (GPa)	Tensão Específica (σ) (GPa)	Densidade (ρ) (g/cm ³)	Módulo Específico (E/ ρ)	Força Específica (σ_u/ρ)
Aços Macios		210	0,45 – 0,83	7,8	26,9	0,058–0,106
Alumínio 2024-T4		73	0,41	2,7	27,0	0,152
6061-T6		69	0,26	2,7	25,5	0,096
E-vidro-epóxi	57	21,5	0,57	1,97	10,9	0,26
Kevlar 49-epóxi	60	40	0,65	1,40	29,0	0,46
Fibra de Carbono-epóxi	58	83	0,38	1,54	53,5	0,24
Boro-epóxi	60	106	0,38	2,00	53,0	0,19

Fonte. Argarwall (1999, p.10). Adaptado pelo autor.

Além das propriedades de tração, as propriedades de compressão das fibras também são de interesse em muitas aplicações. Ao contrário das propriedades de tração, as de compressão, não podem ser determinadas diretamente por simples testes das compressões nos filamentos ou fios. Vários métodos indiretos foram utilizados para determinar a resistência à compressão das fibras, um desses é o teste de “loop” em que um filamento é curvado na forma de um loop sem falhar. A resistência à compressão da fibra é determinada a partir da tensão compressiva na superfície da fibra. Em geral, a resistência à compressão das fibras é inferior à sua resistência à tração. A resistência à compressão das fibras de boro é maior que a do carbono e fibras de vidro. Todas as fibras orgânicas têm baixa compressão, inclui também o Kevlar 49, que tem uma força de compressão quase 10 vezes menor do que a sua resistência à tração (MALLICK, 2007)

A anisotropia controlada significa que a proporção de valores de propriedade em diferentes direções pode ser variada ou controlada. Por exemplo, em um compósito unidirecional, a relação resistência-força transversal longitudinal pode ser facilmente alterada, modificando a fração do volume da fibra. Da mesma forma,

outras propriedades podem ser alteradas modificando o material e as variáveis de fabricação. Além disso, os laminados são projetados e construídos a partir de compósitos unidirecionais, para obter as propriedades direcionais desejadas devem corresponder aos requisitos de aplicações específicas. (AGARWAL, 1999).

2.7 Fibras de vidro

Conforme Mallick (2007) as fibras de vidro são as mais comuns de todas as fibras de reforço para compósitos de matriz polimérica (PMC). As principais vantagens das fibras de vidro são de baixo custo, alta resistência à tração, alta resistência química e excelentes propriedades de isolamento. As desvantagens são módulos de tração relativamente baixo e alta densidade, sensibilidade à abrasão durante o manuseio, resistência à fadiga baixa e alta dureza.

As fibras de vidro são as mais comuns de todas as fibras de reforço para compósitos de matriz de polímero. As principais vantagens das fibras de vidro em relação às demais é o baixo custo e alta resistência, porém possuem pouca resistência à abrasão. Elas também apresentam baixa adesão a algumas resinas de matriz polimérica, particularmente na presença de umidade, na qual para melhorar a aderência, sua superfície é frequentemente tratada com produtos químicos chamados agentes de acoplamento. As fibras de vidro também têm um módulo menor em comparação com as outras fibras de reforço avançadas, como Kevlar, carbono e boro (AGARWAL, 1999).

2.8 Fibras de carbono e grafite

Estruturalmente, as fibras de carbono contêm uma mistura de carbono amorfo e grafite. O seu elevado módulo de tração resulta da forma gráfica, na qual os átomos de carbono são arranjados em uma estrutura alográfica de cristais de planos ou camadas paralelos. Os átomos de carbono em cada plano estão dispostos nos cantos por hexágonos regulares de interconexão (MALLICK, 2007).

As fibras de carbono / grafite são o reforço predominante de alta resistência e alto módulo, utilizado na fabricação de compósitos de matriz de polímero de alto desempenho. Na estrutura de grafite, os átomos de carbono são dispostos na forma de camadas hexagonais, com uma embalagem muito densa nos planos de camada. A ligação de alta resistência entre os átomos de carbono no plano da camada resulta num módulo extremamente elevado, enquanto a ligação fraca do tipo Van der Waals¹ entre as camadas vizinhas apresenta um módulo inferior nessa direção. Em termos estritos, o termo "fibras de grafite" é uma expressão errônea, porque não existe uma estrutura de cristal de grafite verdadeira nas fibras. O termo "fibra de grafite" é usado para descrever fibras que têm um teor de carbono superior a 99%, enquanto o termo "fibra de carbono" descreve fibras que têm um teor de carbono de 80-95%. O teor de carbono é uma função da temperatura do tratamento térmico. Os intervalos de propriedades típicos de cada classe de fibras de carbono são apresentados na Tabela 3. As fibras de carbono estão disponíveis numa grande variedade de combinações e propriedades, porque estas podem ser facilmente alteradas, controlando sua estrutura através do processo de fabricação (por exemplo, por temperatura de tratamento térmico). As propriedades da fibra mudam de lote para lote e conforme os fabricantes melhoram a tecnologia da fibra. A tecnologia atual para produzir fibras de carbono geralmente se concentra na decomposição térmica de vários precursores orgânicos. No entanto, atualmente as fibras de carbono disponíveis são feitas usando um dos três materiais precursores: poliacrilonitrilo (PAN), *pitch* e *rayon* (fibra têxtil lustrosa) (AGARWAL, 1999).

1

Van der Waals : é a soma de todas as forças atrativas ou repulsivas, que não sejam forças devidas a ligações covalentes entre moléculas (ou entre partes da mesma molécula) ou forças devido à interação eletrostática de íons

Tabela 3 - Propriedades típicos de cada classe de fibras de carbono.

Propriedades, unidades	PAN	Pitch	Rayon
Módulo específico, Mpa	1925-6200	2275-4060	2070-2760
Módulo de tensão, GPa	230-595	170-980	415-550
Densidade, g/cm ³	1,77-1,96	2,0-2,2	1,7
Alongamento, %	0,4-1,2	0,25-0,7	-
Coeficiente de expansão térmica			
Axial, 10 ⁻⁶ /°C	-0,75 para -0,4	-1,6 para -0,9	-
Transversal, 10⁻⁶/°C	7-10	7,8	-
Condutividade térmica, W/mK	20-80	400-1100	-
Diâmetro de fibra, µm	5-8	10-11	6,5

Fonte: Agarwal (p.26,1999). Adaptado pelo autor.

As fibras de carbono estão disponíveis em várias formas: rolo contínuo, cortado, manta ou na forma enrolada em bobinas, conforme é demonstrada na Figura 2.

Figura 2 – Bobinas de Fibra de carbono



Fonte: Fonte digital².

2.9 Fibras de aramida

As fibras de polímero-aramida (Kevlar) foram introduzidas pela primeira vez em 1971. Considera-se que os polímeros formadores de fibra de aramida, isto é, as poliamidas aromáticas, são preparadas por policondensação em solução de diaminas e halogenetos de diácidos a baixas temperaturas. Os polímeros são centrifugados a partir de soluções de ácido fortes, (por exemplo, H_2SO_4 concentrado) por um processo de centrifugação úmida a jato seco (AGARWAL, 1999).

Conforme Mallick (2007), as fibras de aramida são de poliamida aromáticas altamente cristalinas que possuem a menor densidade e a maior relação resistência / peso entre as fibras de reforço atuais. Kevlar 49 é o nome comercial de uma das fibras de aramida disponíveis no mercado. Como um reforço, as fibras de aramida são usadas em muitas aplicações aeronáuticas e aeroespaciais, na qual é importante o peso, alta resistência à tração e a resistência ao dano de impacto. Como as fibras de carbono, eles também têm um coeficiente negativo de expansão térmica na direção longitudinal, que é usado na concepção de painéis compósitos de

expansão de baixa temperatura. As principais desvantagens dos compósitos reforçados com fibras de aramida são suas baixas resistências à compressão e dificuldade para corte e usinagem.

As propriedades da fibra podem ser alteradas usando aditivos solventes, variando as condições de rotação e usando tratamentos térmicos posteriores. As fibras Kevlar possuem propriedades únicas. A resistência à tração e o módulo são substancialmente maiores e o alongamento da fibra é significativamente menor para as fibras de Kevlar do que para outras fibras orgânicas. As fibras de Kevlar têm características precárias na compressão, com resistência à compressão sendo apenas um oitavo da resistência à tração. Isso resulta da sua estrutura anisotrópica, que permite um rendimento local bastante fácil, dobradura e torção da fibra em compressão. Eles não são tão frágeis quanto às fibras de vidro ou de grafite e podem ser facilmente tecidos em teares de tecidos convencionais. As propriedades representativas das fibras de Kevlar são apresentadas na Tabela 4 (AGARWAL, 1999).

Tabela 4 - Propriedades representativas das fibras de Kevlar

Propriedade, unidade	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 129	Kevlar 149
Diâmetro, μm	12	12	-	-
Densidade, g/cm^3	1,44	1,44	1,44	1,44
Tensão Específica, Mpa	2760	3620	3380	3440
Módulo de Tensão, GPa	62	124	96	186
Alongamento, %	3,4	2,8	3,3	2,5
Coeficiente de expansão térmica (0- 100 °C), $\text{m/m/}^\circ\text{C}$				
Na direção axial	-2×10^{-6}	-2×10^{-6}	-2×10^{-6}	-2×10^{-6}
Na direção radial	60×10^{-6}	60×10^{-6}	-	-

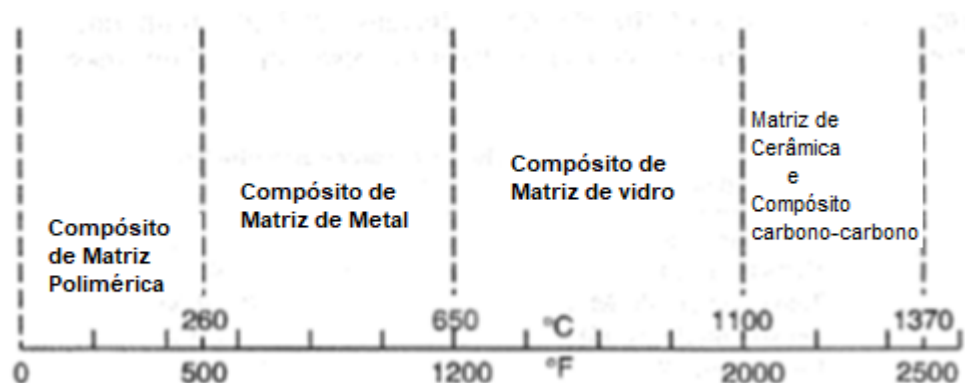
Fonte. Argarwall (p.27, 1999). Adaptado pelo autor.

2.10 Materiais das matrizes

Conforme Mallick (2007), os papéis da matriz em um compósito reforçado com fibra são: (1) manter as fibras no lugar, (2) transferir tensões entre as fibras, (3) proporcionar uma barreira contra um ambiente adverso, como produtos químicos e umidade, (4) para proteger a superfície das fibras de degradação mecânica. A matriz desempenha um papel menor na capacidade de carga em uma estrutura compósita, porém a seleção de uma matriz tem uma grande influência no cisalhamento compressivo, interlaminar, bem como nas propriedades de cisalhamento no plano do material compósito. A interação entre fibras e matriz também é importante no desenvolvimento de estruturas tolerantes a danos.

As fibras, devido às suas pequenas dimensões transversais, não podem ser carregadas diretamente, e, atuando sozinhas, não podem transmitir cargas de uma para outra para poder compartilhar uma carga, o que limita severamente seu uso direto em aplicações de engenharia de apoio de carga. Esta limitação é superada incorporando-os em um material de matriz para formar um compósito, na qual esta une as fibras, transfere cargas entre elas e as protege contra ataques ambientais e danos causados pelo manuseio. A matriz cujo material frequentemente limita o serviço de um compósito tem uma grande influência em várias propriedades mecânicas do compósito, como módulo transversal e resistência, propriedades de cisalhamento e propriedades em compressão. Faixas de temperatura nas quais os compósitos com diferentes tipos de matrizes podem ser usados, mostrados na Figura 3. As características físicas e químicas da matriz, como temperaturas de fusão ou cura, viscosidade e reatividade com fibras, influenciam a escolha do processo de fabricação (AGARWAL, 1999).

Figura 3 - Faixas de temperatura nas quais os compósitos com diferentes tipos de matrizes podem ser usados



Fonte: Adaptado de Agarwal (p.30, 1999).

Para Mallick (2007), um polímero é definido como molécula ao longo da cadeia que contém uma ou mais unidades de repetição de átomos, unidas entre si por ligações covalentes fortes. Um material polimérico (comumente chamado de plástico) é uma coleção de um grande número de moléculas de polímero de estrutura química similar (mas não de igual comprimento).

Os polímeros (comumente chamados de plásticos) são a matéria de matriz mais utilizada para compósitos de fibras. Suas principais vantagens são de baixo custo, fácil processabilidade, boa resistência química e baixa gravidade específica. Por outro lado, baixa resistência, baixo módulo e baixas temperaturas de operação limitam seu uso. Eles também se degradam por exposição prolongada à luz ultravioleta e a alguns solventes (AGARWAL, 1999).

2.11 Polímeros termorígidos e termoplásticos

Para Mallick (2007), os polímeros são divididos em duas grandes categorias: termoplásticos e termorígidos. Em um polímero termoplástico, moléculas individuais não são unidas quimicamente, são mantidos no lugar por ligações secundárias fracas ou forças intermoleculares, tais como ligações Van der Waals e ligações de hidrogênio. Com a aplicação de calor, estas ligações secundárias em um polímero termoplástico sólido podem ser temporariamente quebradas e as moléculas agora podem ser movidas em relação uma à outra ou fluir para uma nova configuração se a pressão for aplicada sobre elas. Ao arrefecer, as moléculas podem ser congeladas em sua nova configuração e as ligações secundárias são restauradas, resultando em uma nova forma sólida, por isso, um polímero termoplástico pode ser amolecido, derretido e remodelado quantas vezes for necessário. Em um polímero termorígido, por outro lado, as moléculas são unidas quimicamente através de ligações cruzadas, formando uma estrutura de rede rígida tridimensional. Uma vez que estas ligações cruzadas são formadas durante a reação de polimerização (também chamada de reação de cura), o polímero termorígido não pode ser derretido pela aplicação de calor.

De acordo com a sua estrutura e comportamento, os polímeros podem ser classificados como termoplásticos ou termorígidos. Os polímeros que amolecem ou fundem no aquecimento, denominados polímeros não absolutos, consistem em moléculas de cadeia linear ou ramificada com fortes ligações intramoleculares, porém possuem fracas ligações intermoleculares. A fusão e a solidificação destes polímeros são reversíveis e podem ser remodeladas por aplicação de calor e pressão. Sua estrutura é semi-cristalina ou amorfa, das quais pode-se incluir o polietileno, poliestireno, nylons, policarbonato, poliacetais, poliamida-imida, poliéster-éter cetona (PEEK), polissulfona, sulfureto de polifenileno (PPS) e poliéster imida. Os plásticos termorígidos têm estruturas de rede reticulada ou de rede com ligações covalentes entre todas as moléculas. Eles não derretem, mas se decompõem ao aquecer. Uma vez solidificado por um processo de reticulação (cura), eles não podem ser mais remodelados. Existem faixas típicas de valores para as propriedades das resinas conforme demonstra a Tabela 5, exemplos comuns de

polímeros termorígidos incluem poliésteres epoxídicos, fenólicos, ureias, melamina, silicone e poliamidas (AGARWAL, 1999).

Tabela 5 - Comparação das faixas típicas de valores das propriedades das resinas

Propriedades	Termofixas	Termorígidas
Módulo de Elasticidade (GPa)	1,3 – 6,0	1,0 – 4,8
Resistência à Tração (GPa)	0,02-0,18	0,04-0,19
Temperatura Máxima de Serviço (°C)	50-450	25-230

Fonte: Tita (p.8, 2006).

2.11.1 A importância da propriedade dos polímeros para os compósitos

Certas propriedades físicas e químicas de um polímero têm um significado particular para as propriedades de um compósito. Além disso, os polímeros possuem características únicas que limitam os metais e cerâmicas, tais importâncias são as propriedades mostradas na Tabela 6, na qual, mostra a influência de variáveis externas nas propriedades. Ao contrário dos metais e cerâmicas, os polímeros podem ser consideravelmente influenciados por variáveis externas. Em contraste, as propriedades mecânicas dos metais tipicamente são influenciadas apenas próximas das da temperaturas de fusão (AGARWAL, 1999).

Tabela 6 - Influência de variáveis externas nas propriedades.

	Temperatura	Ambiente	Taxa de deformação
Força	X	X	X
Rigidez	X	X	X
Expansão Térmica	X		
Condutividade Térmica	X		
Permeabilidade	X		
Solubilidade	X		
Envelhecimento ambiental (ultravioleta)	X	X	
Temperatura de fusão (polímero semicristalino)			
Temperatura de transição do vidro (polímero amorfo)	X	X	

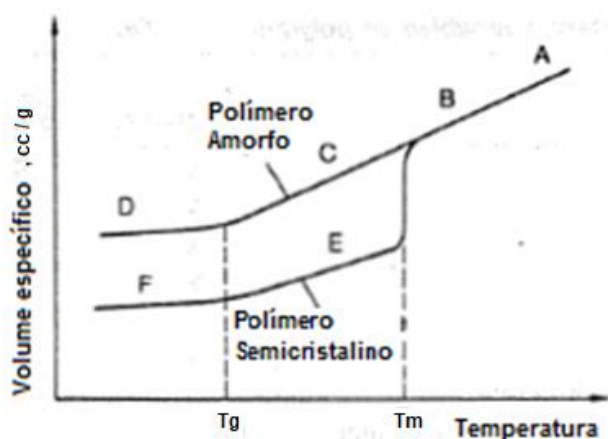
Fonte: Adaptado de Agarwal (p.31,1999).

Existem duas características únicas de sólidos poliméricos que não são observados em metais sob condições normais, ou seja, que suas propriedades mecânicas dependem da temperatura ambiente e da taxa de carga. Perto da temperatura de transição vítrea, indicada por T_g neste diagrama, o sólido polimérico muda de um material duro, às vezes quebradiço (semelhante a um vidro) para um material macio e resistente. Sobre um intervalo de temperatura em torno de T_g , seu módulo é reduzido em até cinco ordens de grandeza. Perto desta temperatura, o material também é altamente viscoelástico. Assim, quando uma carga externa é aplicada, apresenta uma deformação elástica instantânea seguida por uma deformação viscosa lenta. Com o aumento da temperatura, o polímero muda para um sólido tipo borracha capaz de sofrer grandes deformações elásticas sob cargas externas. À medida que a temperatura aumenta, os termômetros amorfos e semicristalinos atingem estados líquidos altamente viscosos, sendo este o último mostrando uma transição acentuada no ponto de fusão cristalino, denotado por T_m . No entanto, para um polímero termorigido, não ocorre derretimento; Em vez disso,

ele caracteriza e, finalmente, queima a temperaturas muito altas. A temperatura de transição vítrea de um polímero termoe estável pode ser controlada variando a quantidade de cruzamento entre as moléculas (MALLICK, 2007).

As limitações de temperatura de um termoplástico dependem se é semicristalino ou amorfo. Os plásticos termorígidos tipicamente possuem estruturas amorfas, mas os termoplásticos podem ser semicristalinos (nunca são 100% cristalinos) ou amorfos, na qual este estado é caracterizado apenas por uma temperatura de transição vítrea (T_g), enquanto que o polímero semicristalino possui um ponto de fusão cristalino (T_m), bem como uma temperatura de transição vítrea. Estas temperaturas de transição são ilustradas na Figura 4, conforme medida por mudanças de volume específicas com a temperatura. As temperaturas de transição (T_g e T_m) de alguns polímeros são dadas na Tabela 7 (AGARWAL, 1999).

Figura 4 - Temperaturas de transição.



Fonte: Adaptado de Agarwal (p.32, 1999).

Tabela 7 - Temperaturas de transição (T_g e T_m).

Polímeros	T_g (°C)	T_m (°C)
Termofixos		
Epóxi	100 -250	-
Poliéster	75 – 150	-
Termoplásticos		
Poliestireno	100	-
Polietileno (HD)	- 80	137
Policarbonato	150	-
Nylon (6,6)	50	255 - 265
Polimetilmetacrilato	105	-
Poliéster cetona (PEEK)	143	334
Sulfeto de polifenileno (PPs)	85	285
Poliéster sulfona	225	-

Fonte: Agarwal (p.33, 1999). Adaptado pelo autor.

2.11.1.1 Materiais comuns de matriz polimérica

Os compósitos avançados mais comuns são compósitos com matriz polimérica (PMCs) consistindo de um polímero (por exemplo, epóxi, poliéster, uretano) reforçado por fibras de diâmetro fino (por exemplo, grafite, aramidas, boro). Por exemplo, compósitos de grafite / epóxi são aproximadamente cinco vezes mais fortes que o aço em uma base de peso por peso. As razões pelas quais eles são os compósitos mais comuns incluem seu baixo custo, alta resistência, e princípios de fabricação simples (KAW,2006).

As resinas de poliéster e epóxi são os materiais de matriz poliméricos mais comuns utilizados com fibras de reforço de alto desempenho. Ambos são polímeros termorígidas. Fácil processabilidade e boa resistência química, são as principais vantagens (AGARWAL, 1999).

Existem vários materiais de matriz que foram usados comercialmente ou em pesquisa, entre esses, os polímeros termofixos, como epóxis, poliésteres e vinílicos, são mais comumente usados para material de matriz em compósitos reforçados com fibras longas ou contínuas, principalmente em função da facilidade de processamento devido à sua baixa viscosidade. Polímeros termoplásticos são mais

comumente usados com compósitos reforçados com fibras curtas, que são moldados por injeção; no entanto, o interesse na matriz termoplástica reforçada com fibra continua está crescendo. Matrizes metálicas e cerâmicas são consideradas principalmente para aplicações de alta temperatura (MALLICK,2007)

2.11.1.2 Resina de poliéster

A resina de poliéster é um sólido de poliéster insaturado (reativo), dissolvido num monômero polimerizável. Os poliésteres não saturados são polímeros lineares de cadeia longa, contendo várias ligações duplas de carbono. Eles são feitos por uma reação de condensação entre um glicol (etileno, propileno ou dietilenoglicol) e um ácido dibásico não saturado (maleico ou fumárico). O comprimento da molécula ou grau de polimerização “n” pode variar. A resina geralmente será um sólido, dissolvido em um monômero (reativo) polimerizável tal como o estireno, que também contém ligações duplas de carbono e atua como um agente de reticulação por ponte das moléculas de poliéster adjacentes nos seus pontos de insaturação. O monômero também atua como diluente, para reduzir a viscosidade do poliéster, afim de facilitar o processo. Este processo de cura ou reticulação é iniciado pela adição de uma pequena quantidade de um iniciador de radicais / agente de cura, tal como um peróxido orgânico (por exemplo, peróxido de benzoílo) ou um compósito azo alifático (AGARWAL, 1999).

Como no caso das resinas epóxi, as propriedades das resinas de poliéster dependem fortemente da densidade do reticulado. O módulo, a temperatura de transição vítrea e a estabilidade térmica das resinas de poliéster curadas são melhoradas pelo aumento da densidade de ligação cruzada, mas a energia de deformação para falha e de impacto é reduzida. O principal fator que influencia a densidade de ligação cruzada é o número de pontos de insaturação em uma molécula de poliéster não curada. A maneira mais simples de controlar a frequência de pontos de insaturação é variar a proporção em peso de vários ingredientes utilizados para a produção de poliésteres insaturados (MALLICK, 2007).

Esta reação não produz um subproduto e é uma reação exotérmica, assim, o processo de cura é acompanhado de contração, bem como um aumento de sua temperatura. A cura é feita à temperatura ambiente com ou sem aplicação de pressão, qual as capacidades de modificação ou adaptação da estrutura química de poliésteres através de técnicas de processamento e seleção de matérias-primas tornam-se versáteis. Por exemplo, os ácidos e glicóis de partida, bem como os monómeros solventes, podem ser variados. As propriedades típicas dos poliésteres termofixáveis são apresentados na Tabela 8 (AGARWAL, 1999).

Tabela 8 - Propriedades típicas dos poliésteres termorígidos

Densidade, g/cm³	1,1 – 1,4
Tensão Específica. Mpa	34,5 – 103,5
Módulo de Tensão, GPa	2 – 4,4
Expansão térmica, 10⁻⁶/°C	55 - 100
Absorção de água, % dentro 24h	0,15 – 0,6

Fonte: Agarwal (p.36, 1999). Adaptado pelo autor.

2.11.1.3 Resina epóxi

As resinas epóxi são líquidos orgânicos de baixo peso molecular, contendo vários grupos epóxidos, que são anéis de três membros com um átomo de oxigênio e dois átomos de carbono (AGARWAL, 1999).

Conforme Mallick (2007) os materiais de partida para matriz epoxi consistem em resinas líquidas orgânicas de baixo peso molecular contendo vários grupos epóxido, que são anéis de três membros de um átomo de oxigênio e dois átomos de carbono. A reação de polimerização (cura) para transformar a resina líquida em estado sólido é iniciada pela adição de pequenas quantidades de um agente de cura reativo imediatamente antes de incorporar fibras na mistura líquida.

O processo mais comum para a produção de epóxis é a reação da epcloridrina com bisfenol-A e a obtenção de reticulação através da introdução de

substâncias químicas que reagem com os grupos epóxi entre as cadeias adjacentes. A resina epoxi é um líquido viscoso, e a viscosidade é uma função do grau de polimerização n . Cada molécula epoxídica é terminada com o grupo epóxi. Um agente de cura é misturado no epóxi líquido para polimerizá-lo e formar um polímero reticulado de rede sólida. Os sistemas epóxi, como os poliésteres, vão ser curados à temperatura ambiente. A escolha do agente de cura determina se é necessária uma temperatura ambiente ou elevada. O calor é adicionado com bastante frequência para acelerar a cura e obter um grau mais elevado. As propriedades de uma resina epóxi curada dependem da composição química do pré-polímero de epóxi, que pode ser modificado, bem como sobre a molécula de agente de cura. As propriedades típicas da resina epóxi moldada são dadas na Tabela 9 (AGARWAL, 1999).

Tabela 9 - Propriedades típicas da resina epóxi moldada (até 23°C).

Densidade, g/cm³	1,2 – 1,3
Tensão Específica, Mpa	55 – 130
Módulo de Tensão, GPa	2,75 – 4,10
Expansão térmica, 10⁻⁶/°C	45 – 65
Absorção de água, % dentro 24h	0,08 – 0,15

Fonte. Agarwal (p.37,1999). Adaptado pelo autor.

2.12 Fabricação de compósitos

Os produtos acabados são formados a partir de materiais como plásticos e metais por métodos de moldagem. O material foi criado pela primeira vez e depois processado em uma fase posterior por empresas especializadas em forja, moldagem por injeção, porém, os produtos que compõem os compósitos podem ser criados simultaneamente com a criação do material. Tal é o caso quando o filamento enrolando um tubo de um polímero e de fios de fibra de vidro (AGARWAL, 1999).

Conforme Mallick (2007) um ingrediente-chave na aplicação bem-sucedida de produção de um material ou componente é a escolha do método de fabricação confiável e econômico. A competitividade depende em grande parte da taxa de produção e a confiabilidade exige uma qualidade uniforme nas peças. O método de

fabricação inicial de peças estruturais compostas reforçadas com fibras usava uma técnica de disposição manual, mesmo que este tipo de armazenamento seja um processo confiável, é por natureza muito lento e trabalhoso. Nos últimos anos, particularmente devido ao interesse gerado na indústria automotiva, há mais ênfase no desenvolvimento de métodos de fabricação que possam suportar taxas de produção em massa. Moldagem por compressão, pultrusão e enrolamento de filamentos representam três desses processos de fabricação.

A escolha de um processo de fabricação é diretamente influenciada pela natureza química da matriz (por exemplo, termoesclerida ou termoplástica no caso de um polímero) e a temperatura necessária para formar, derreter ou curar a matriz (AGARWAL, 1999).

2.13 Fabricação de compósitos de matriz de resina termorígida

Monômeros ou pré-polímeros de sistemas de resina termorígidos estão geralmente em estado líquido, estes se tornam sólidos como resultado de uma reação química. Durante esta reação química, moléculas de monômeros ou pré-polímeros estão ligadas entre si para formar redes de polímeros. Este processo de ligação das moléculas é a permeação, polimerização e reticulação em polímeros. A reticulação é realizada por catalisadores ou agentes de cura normalmente selecionados para proporcionar uma combinação desejada de tempo e temperatura para completar a reação adequada para um produto particular, cujo endurecimento de cura e acompanhamento são irreversíveis. O aquecimento adicional não os derrete ou suaviza para moldagem ou remodelação. No entanto, a cura pode ser encenada para que a formação do compósito possa ser realizada, separada da fase final de endurecimento (AGARWAL, 1999).

De acordo com Mallick (2007) tradicionalmente, os polímeros termofixos (também chamados de resinas) têm sido usados como material de matriz para compósitos reforçados com fibras. Os materiais de partida utilizados na polimerização de um polímero termorígido são geralmente produtos químicos líquidos de baixo peso molecular com viscosidades muito baixas. As fibras são

puxadas ou imersas nesses produtos químicos antes do início da reação de polimerização, como a viscosidade do polímero no momento da incorporação da fibra é muito baixa, pode ser possível conseguir uma boa umidificação entre as fibras e a matriz sem o auxílio de alta temperatura ou pressão. O umedecimento da superfície da fibra é extremamente importante para alcançar a interação fibra-matriz no compósito, um requisito essencial para um bom desempenho mecânico. Entre outras vantagens do uso de polímeros termorígidos, pode-se acrescentar a sua estabilidade térmica e resistência química.

Os processos de fabricação de compósitos de matriz de resina termorígida, podem ser classificados como processos de formação dos molhos usando pré-misturas ou pré-impregnados. Nos processos de formação úmida, o produto final é formado enquanto a resina é bastante fluida e, em seguida, o processo de cura é geralmente completado pelo título. Os processos úmidos incluem, *lay-up*³ manual, moldagem de sacos, moldagem por transferência de resina, enrolamento de filamentos e pultrusão. Nos processos que utilizam pré-misturas, como o nome sugere, a preparação do material é separada do *lay-up* ou moldagem, tais como compósitos de moldagem a granel (BMCs) e moldagem de folhas (SMCs). Estes são compósitos de resina, enchimentos, fibras e são parcialmente curados. Pré-impregnados são geralmente folhas parcialmente curadas de fibras ou tecidos orientados. O material da matriz em algumas das pré-misturas é engrossado de modo que sua aderência seja livre ou ligeiramente pegajoso, não flui e pode ser manipulado facilmente. O espessamento é conseguido pelo uso de um agente espessante e pelo avanço da cura da resina. Frações de alto volume de fibra podem ser alcançadas com distribuição uniforme de fibras (AGARWAL, 1999).

3

Lay-up: Se refere ao processo básico na moldagem de compósitos

2.13.1 Enrolamento de filamentos

Primeiramente, o processo de enrolamento filamentar foi projetado para a fabricação de estruturas cilíndricas, porém com o passar do tempo verificou-se que esse processo obtinha-se bons parâmetros de controle de execução, que são de extrema importância para o desenvolvimento de peças que necessitam de um alto desempenho, tais como: os vasos de pressão, fuselagens de aviões, rotores utilizados em helicópteros, corpos específicos para mísseis e peças cônicas com bastante complexidade (SRIKANTH; RAO, 2011).

Neste processo, suas camadas de compósito são fornecidas em meio ao enrolamento de um ou mais *rovings*⁴ em volta de um mandril rotativo. Esses *rovings* podem receber um banho de resina anterior ao processo, os pré-pregs que serão citados posteriormente, formando os conhecidos *towpregs*¹ (ABDALLA et al., 2007).

Conforme Agarwal (1999), “o enrolamento de filamentos é uma técnica utilizada para a fabricação de superfícies de revolução, como tubos cilíndricos e esferas, é utilizada com frequência para a construção de grandes tanques e tubulações para a indústria química.” O estabelecimento preciso de reforço contínuo em padrões pré-descritos é a base do método de enrolamento de filamentos. Os reforços contínuos na forma de *rovings* são alimentados a partir de uma multiplicidade de *creels*⁵. O reforço vai dos *creels* para um banho de resina e pode ser recolhido em uma faixa de largura dada e enrolada sobre um mandril macho rotativo. Os ângulos de enrolamento e a colocação dos reforços são controlados através de máquinas especialmente concebidas, que atravessam velocidades

4

Rovings: um roving é um feixe longo e estreito de fibras, são produzidos durante o processo de fabricação de fios de lã, algodão cru ou outras fibras.

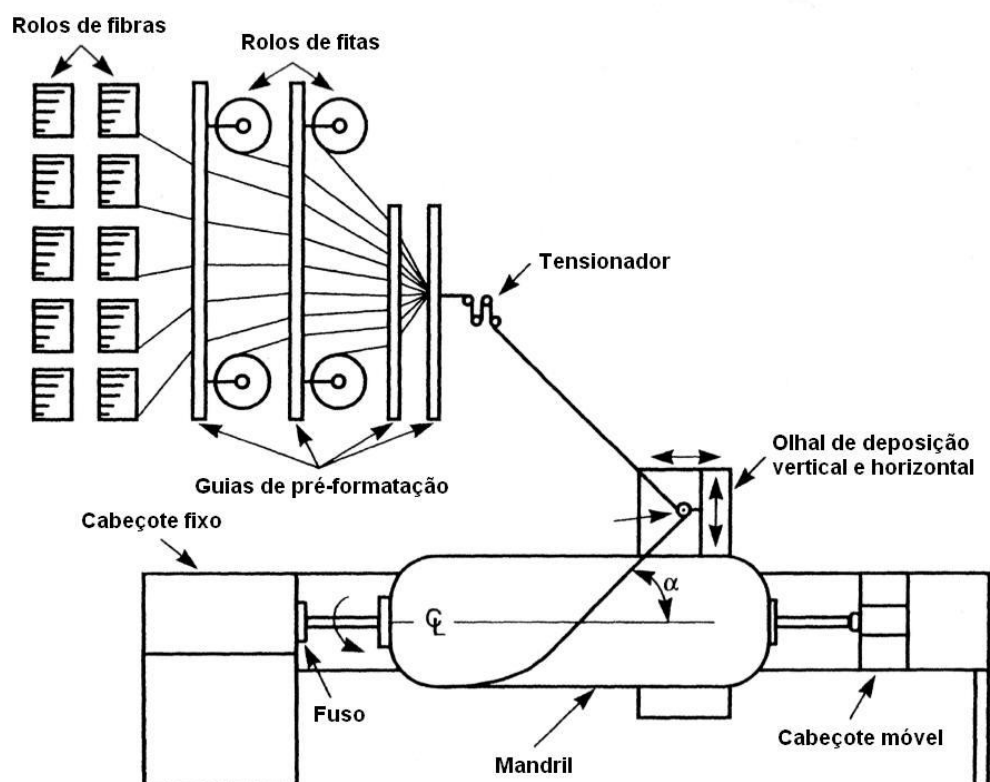
5

Creels: Um creel é uma prateleira metálica que contém pacotes roving em intervalos desejados e projetados para puxar roving do interior da embalagem.

sincronizadas com a rotação do mandril. Os reforços podem ser envoltos em bandas adjacentes, que são escalonadas na largura da banda e que eventualmente cobrem toda a superfície do mandril. A técnica tem a capacidade de variar a tensão do enrolamento, o ângulo de inclinação e o conteúdo de resina em cada camada de reforço até obter a espessura desejada.

O processo de enrolamento filamental tem vantagens frente a outras técnicas de processamento de compósitos, tais como, elevada produtividade, maior repetitividade e exatidão no posicionamento de suas fibras. A utilização das fibras contínuas em um processo de enrolamento de filamentos simplifica a fabricação de muitas peças e melhora a sua confiabilidade. A continuidade destas fibras torna-se essencialmente necessário para que seja possível eliminar as descontinuidades dos materiais nas camadas do laminado, se adicionada a chance de produzir peças de diferentes espessuras de paredes e geometrias, esta condição torna-se outra vantagem importante. A figura 5, demonstra um diagrama esquemático de uma máquina de enrolamento filamental genérico com as suas etapas para o processo de fabricação do compósito (ALMEIDA JR., 2016).

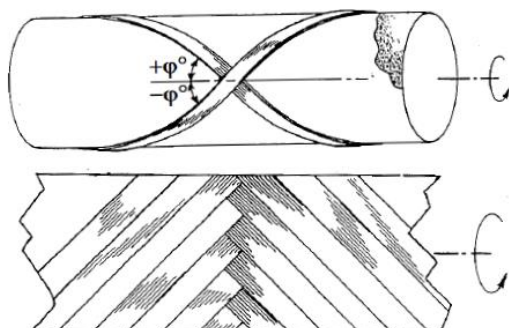
Figura 5 - Esquema do processo produtivo de uma máquina de enrolamento de filamentos.



Fonte: Almeida Jr. (2016, p.11).

Vários ciclos, de ida e volta na deposição das fibras são necessários para o recobrimento total de uma camada, com isso cada lâmina fabricada por enrolamento filamental é balanceada e simétrica em relação ao seu plano central da espessura, pois o ângulo de deposição é $\pm\phi$, conforme demonstrada na Figura 6. As velocidades transversais de transporte das fibras possuem um sincronismo em relação a velocidade de giro do mandril, acarretando um ângulo de orientação das fibras pré-determinado para a etapa de programação do enrolamento de filamentos. (ALMEIDA JR, 2016).

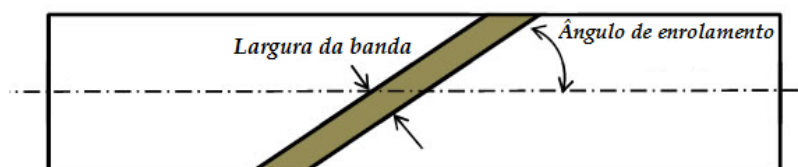
Figura 6 - Ilustração de um ciclo de enrolamento sobre superfície cilíndrica.



Fonte: Almeida Jr., (2016, p.13).

Conforme demonstrada na Figura 7, pode-se verificar a largura da banda e o seu posicionamento correto dos filamentos nas roldanas do alimentador, estes dois parâmetros são fundamentais para que haja uma alta precisão em seu ângulo de enrolamento de filamentos. (ALMEIDA JR., 2016)

Figura 7 - Largura da banda em uma estrutura fabricada por processo de enrolamento filamental.



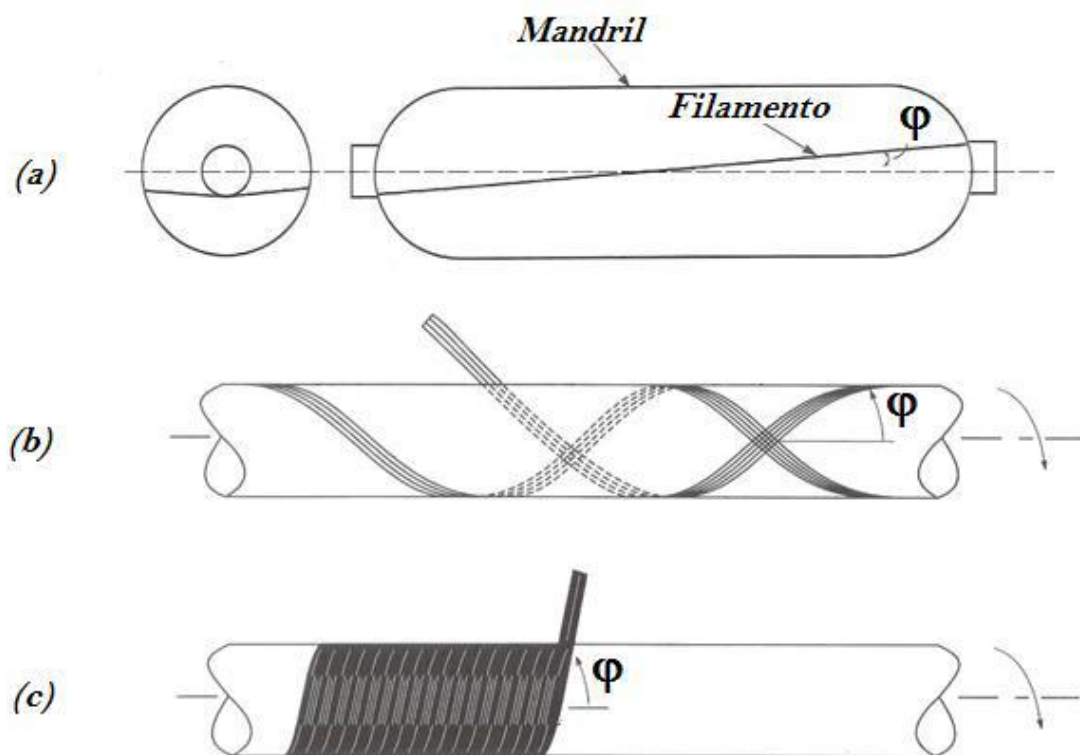
Fonte: Almeida Jr., (p.13, 2016).

Existem alguns efeitos de fabricação específicos para o processo de enrolamento de filamentos que podem afetar significativamente os campos de tensão e de deformação nas camadas compostas de paredes finas, um desses efeitos está relacionado ao padrão de mosaico de enrolamento filamental da camada composta. (MOROZOV, 2006)

2.13.2 Tipos de enrolamento

Conforme (ALMEIDA JR., 2016) dentro de cada ramificação, existem dois tipos básicos de máquinas de enrolamento filamentar, tais como, o helicoidal e polar. Um enrolamento de filamentos tem como referência unicamente o padrão helicoidal, que pode ser considerado os movimentos parecidos aos de um torno, ou seja, o seu mandril rotaciona continuamente a medida que o cabeçote de deposição das fibras é deslocado simetricamente. No enrolamento de filamentos circunferencial, as fibras são inseridas na posição normal em relação ao eixo de rotação do mandril, formando ângulos muito próximos a 90°. O enrolamento filamentar polar é usado quando tem-se a necessidade de alta resistência na direção axial, neste caso o mandril gira com rotação muito baixa, enquanto que o alimentador rotaciona em um ângulo pré-definido. A figura 8 ilustra os diferentes modelos de enrolamento de filamentos.

Figura 8 - Enrolamentos polar (a), helicoidal (b) e circumferencial (c).

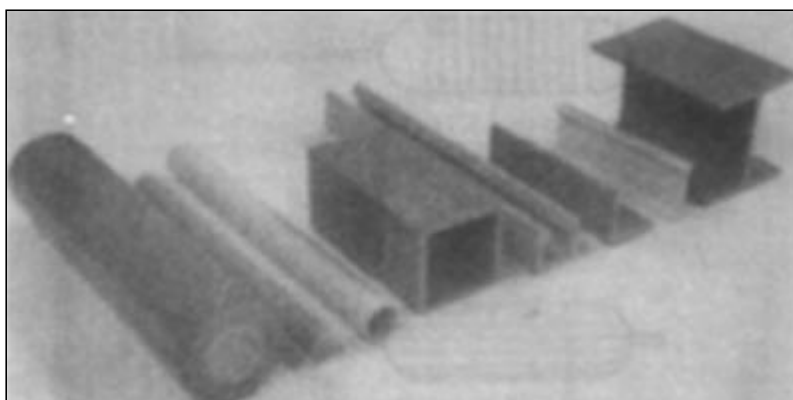


Fonte: Almeida Jr., (p.13, 2016).

2.14 Pultrusão

Pultrusão é um processo automatizado para a fabricação de materiais compósitos em perfis contínuos de seção transversal constante. Esta técnica possui algumas "semelhanças com extrusão de alumínio ou extrusão termoplástica". Em pultrusão, no entanto, o produto é puxado do compartimento em vez de forçado por pressão. Um grande número de perfis, como tubos e várias formas estruturais, podem ser produzidos usando matrizes apropriadas. Uma fotografia que mostra várias formas pultrusadas é dada na Figura 9. Os perfis podem ter alta resistência e rigidez na direção do comprimento, com conteúdo de fibra tão alto quanto 60-65% em volume (AGARWAL, 1999).

Figura 9 - Exemplos de peças pultrusadas

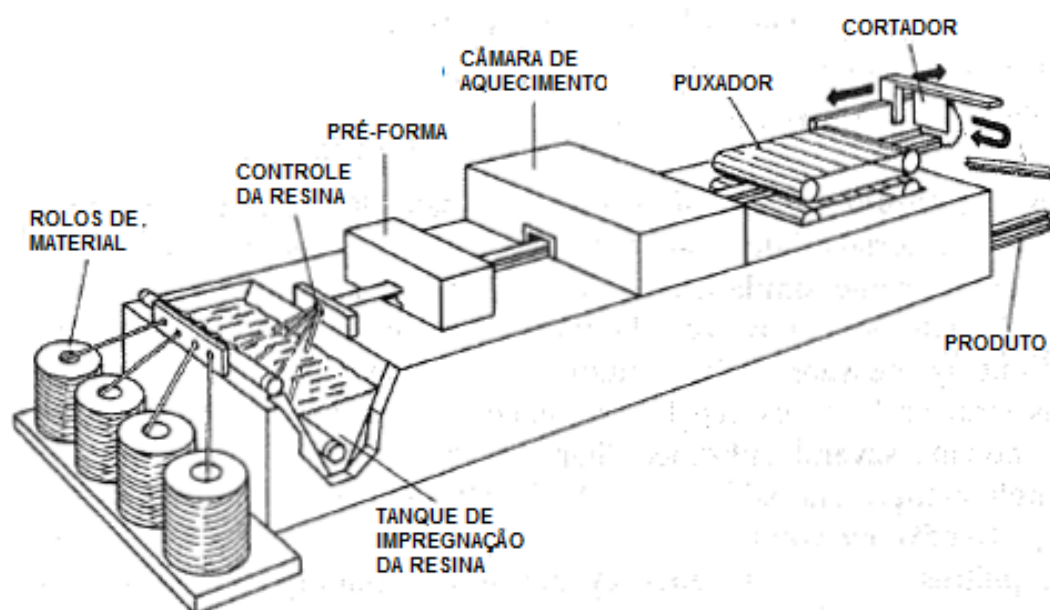


Fonte: Agarwall (p.52, 1999). Adaptado pelo autor.

Pultrusão é um processo de moldagem contínua para a produção de membros estruturais longos e retos de área de seção transversal constante. Entre os produtos pultrudados comuns estão barras sólidas, tubos ocos, chapas planas e vigas de várias seções transversais, incluindo ângulos, canais, seções de chapas e seções com flange larga. Os processos de pultrusão para produzir seções transversais variáveis ao longo do comprimento, bem como membros curvados, também foram desenvolvidos. O principal constituinte de um produto pultrudado são mechas de cordões contínuos orientados longitudinalmente. Várias camadas de tapetes ou mechas tecidas são adicionadas na superfície externa ou perto dela para melhorar sua resistência transversal. O teor total de fibras num membro pultrudado pode ser tão alto quanto 70% em peso; no entanto, devido à presença de tapetes ou mechas tecidas, a sua força e módulo longitudinais são inferiores aos obtidos com todos os cordões de fibras unidirecionais (MALLICK, 2007).

O processo de pultrusão é mais adequado para resinas termorigidas que curam, sem produzir um subproduto de condensação (poliéster e epóxi). As etapas do processo completo da pultrusão podem ser verificados na Figura 8. Os reforços usados consistem em fibras contínuas, como rovings ou tapete de cordão cortado ou uma combinação dos dois, dependendo da força e rigidez requerida no perfil moldado. Podem ser utilizadas resinas termoplásticas, mas é necessário um equipamento de impregnação especial para derreter ou suavizar a resina (AGARWALL, 1999).

Figura 10 - Processo de pultrusão



Fonte: Agarwall (p.52, 1999). Adaptado pelo autor.

2.15 Pré-impregnados

Os pré-impregnados, mais reconhecidos como *prepregs*, são produtos intermediários, na qual já ocorreu anteriormente a impregnação das fibras pela matriz. Depois de ocorrer a impregnação, essa resina inicia o processo de cura, que posteriormente é estancada, na maioria das vezes de forma forçada, iniciada com a redução em sua temperatura. A resina é direcionada para um estágio, onde será realizada a sua cura para facilitar sua moldagem, melhorar a manipulação e manter a limpeza do local de trabalho no decorrer do processo (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Para Agarwall (1999), “esta é a forma curta para plásticos reforçados com fibra pré-impregnados. Os pré-impregnados consistem em roving, tecidos, folhas de reforço de fibra unidirecionais contínuas ou folhas de fibras cortadas aleatórias impregnadas com um sistema de resina parcialmente curado.” Estes diferem dos compósitos de moldagem de folhas em que os agentes espessantes, enchimentos, pigmentos e aditivos raramente estão presentes. A maioria dos pré-impregnados são

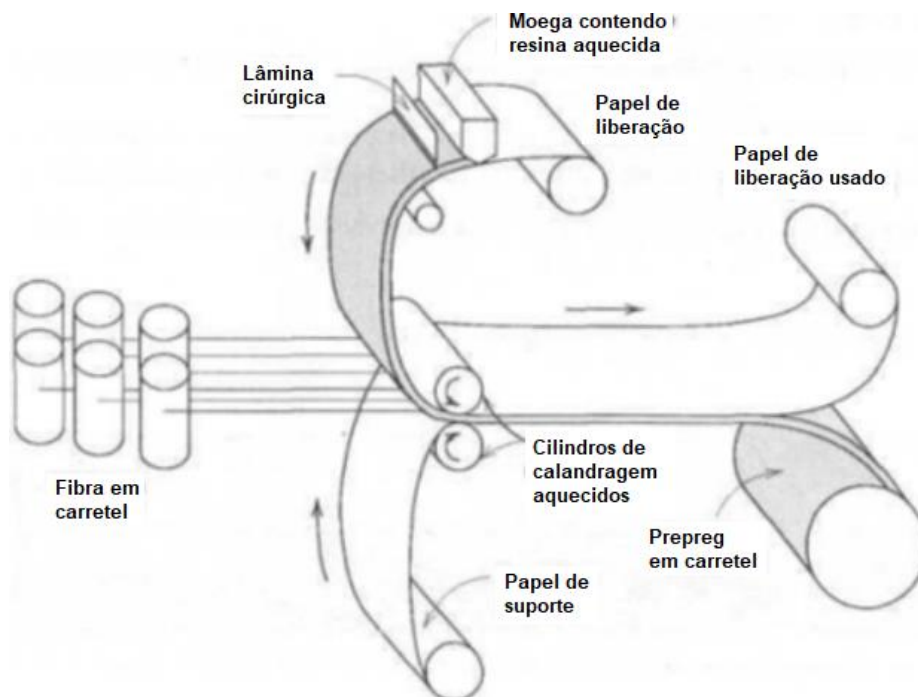
baseados em sistemas de resina epóxi, e os reforços geralmente incluem fibra de vidro, carbono e aramida.

Os *prepregs*, foram elaborados para atender uma questão que necessitava uma demanda de alta qualidade, referente ao setor aeroespacial, pois exigia um alto custo nas utilização das aplicações que precisam um maior desempenho. Este produto intermediário traz um controle na precisão da fração volumétrica de reforço (V_f), que na maioria das vezes, tem em sua constituição, uma matriz epoxídica com reforços de fibras de carbono ou vidro. Estes *prepregs* de fibra de carbono apresentaram uma vasta gama de aplicações, na qual o seu fator determinante é seu baixo peso e alta resistência mecânica (STARK et al., 2013).

Pré-impregnados são fabricados a partir de uma solução de resina ou um sistema de resina sem solvente. No primeiro caso, o reforço de fibra é extraído através de uma solução de banho de resina e, em seguida, através de uma lâmina "médica" ou conjunto de rolo de medição para controlar a retirada de resina. O reforço impregnado passa então através de uma zona de aquecimento vertical para evaporar o solvente e avançar parcialmente a cura do sistema de resina. O pré-impregno é então arrefecido e intercalado entre duas camadas de filme de liberação, como papel impregnado de silicone ou filme de polietileno, antes de enrolar em rolo ou cortar em folhas (AGARWAL, 1999).

Conforme Callister (2007) o enrolamento de filamento é um processo na qual as fibras de reforço contínuas posicionam-se de maneira precisa e seguem um padrão predeterminado, com a finalidade de compor uma forma oca (normalmente disposta cilindricamente). O esquema da Figura 11 demonstra o processo do pré impregno das fibras de carbono através de fitas fabricadas em polímeros termofixos.

Figura 11 - Diagrama esquemático ilustrando a produção de fita prepreg usando polímeros termofixos

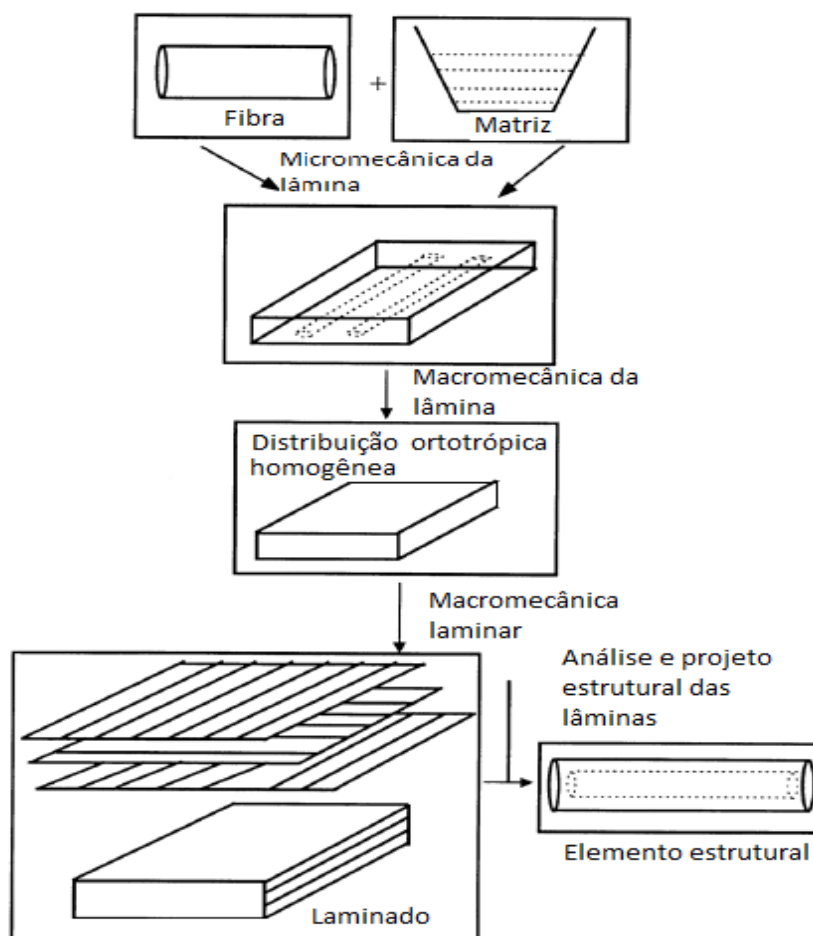


Fonte. Callister (p.407, 2007). Adaptado do autor.

2.16 Análise mecânica de uma estrutura

Segundo Kaw (2006), “um material compósito consiste em dois ou mais constituintes, assim, a análise e o design destes materiais são diferentes dos convencionais, como os metais.” A abordagem para analisar o comportamento mecânico das estruturas compostas é representada na Figura 12.

Figura 12 - Esquema de análise de compósitos laminados



Fonte: Kaw (p.52, 2006). Adaptado do autor.

Para Jones (1999) materiais compósitos têm muitas características de comportamento mecânico diferentes das dos materiais de engenharia mais convencionais. Algumas características são apenas modificações do comportamento convencional, outras são totalmente novas e exigem novos procedimentos analíticos e experimentais. Os materiais de engenharia mais comuns são homogêneos e isotrópicos: um corpo homogêneo tem propriedades uniformes por toda parte, ou seja, as propriedades são independentes de sua posição. Um corpo isotrópico tem propriedades de material que são as mesmas em todas as direções em um ponto, ou seja, as propriedades são independentes de sua orientação.

Uma estrutura feita de materiais compósitos é geralmente composta por várias laminas empilhadas umas nas outras, conhecendo a macromecânica de uma única lâmina, desenvolve-se um laminado, cuja rigidez, coeficientes de expansão térmica e de umidade podem ser encontrados para todo o laminado. Este conhecimento de análise de compósitos pode então constituir a base para o desenho mecânico de estruturas feitas de compósitos. Um material isotrópico possui propriedades que são iguais em todas as direções. Por exemplo, o módulo de aço de Young⁶ é o mesmo em todas as direções. Um corpo homogêneo tem propriedades que são iguais em todos os pontos. Uma haste de aço, é um exemplo de um corpo homogêneo. No entanto, se alguém aquecê-la em uma extremidade, a temperatura em vários pontos seria diferente (Kaw, 2006).

Segundo Mallick (2007), em um material isotrópico, as propriedades são as mesmas em todas as direções. Assim, o material contém um número infinito de planos de simetria com sua propriedade passando por um ponto. Em um material anisotrópico, as propriedades são diferentes em todas as direções, de modo que este não contém planos de simetria em sua propriedade. Os compósitos reforçados com fibras, em geral, contêm três planos ortogonais de simetria da propriedade do material, ou seja, os planos 1–2, 2–3 e 1–3 são classificados como materiais ortotrópicos. As interseções desses três planos de simetria, ou seja, os eixos 1, 2 e 3, são chamadas de direções principais do material.

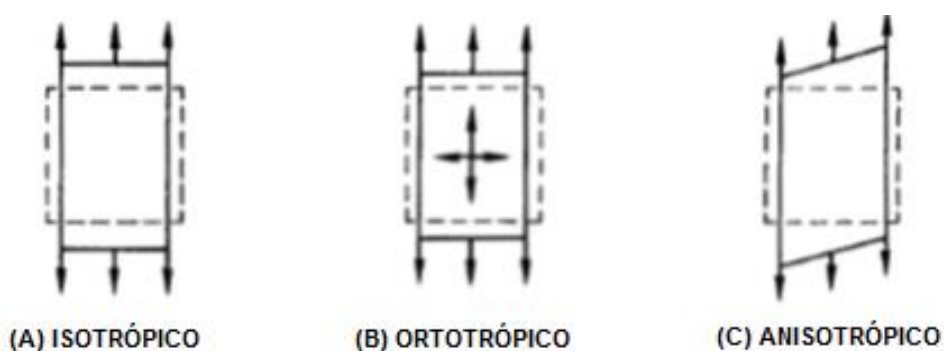
A maioria dos materiais compósitos não são isotrópicos nem homogêneos. Por exemplo, considere o reforço de epoxi com fibras de vidro longas, caso alguém escolha uma localização nesta, as propriedades são diferentes de uma localização na matriz epóxi, pelo qual torna o material compósito não homogêneo. Além disso, a rigidez na direção paralela às fibras é maior do que na direção perpendicular, e,

6

Módulo de aço de Young: O módulo de Young ou módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido

portanto, as propriedades não são independentes, na qual o torna um material compósito anisotrópico (não isotrópico). Em um ponto do material anisotrópico, as propriedades do material são diferentes em todas as direções. Um corpo não homogêneo possui propriedades materiais que são uma função de sua posição. A diferença entre a orientação das diferentes direções dos materiais pode ser visualizado na Figura 13. Uma lâmina é uma única camada plana de fibras unidirecionais ou tecidas dispostas em uma matriz. Um laminado é uma pilha de camadas de compósitos, na qual cada camada pode ser colocada em várias orientações e pode ser constituída por diferentes sistemas de materiais (Kaw, 2006).

Figura 13 - Ilustração material (a) Isotrópico, (b) Ortotrópico e (C) Anisotrópico

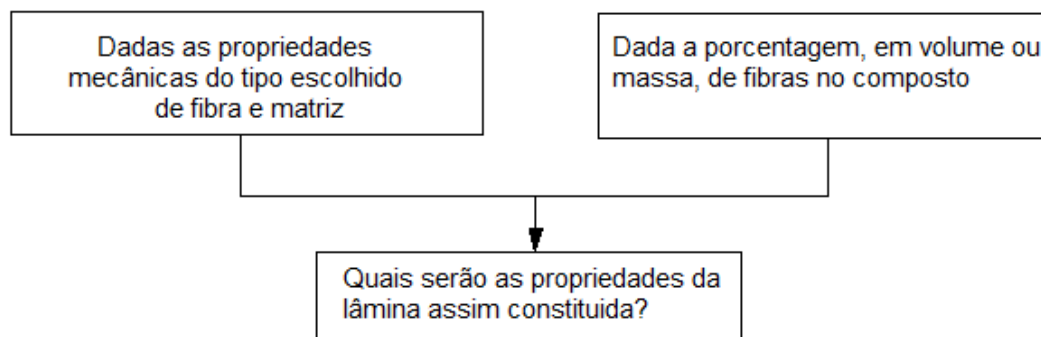


Fonte: Jones (p.13, 1999).

2.17 Micromecânica de uma lâmina

Segundo Mendonça (2005), “um laminado necessariamente deverá ser constituído por várias lâminas iguais, diferenciando apenas umas das outras em sua orientação, para que seja possível atender aos requisitos desejados de projeto ou de fabricação.” Na etapa do projeto deverão ser levados em considerações alguns questionamentos, estes são representados na Figura 14.

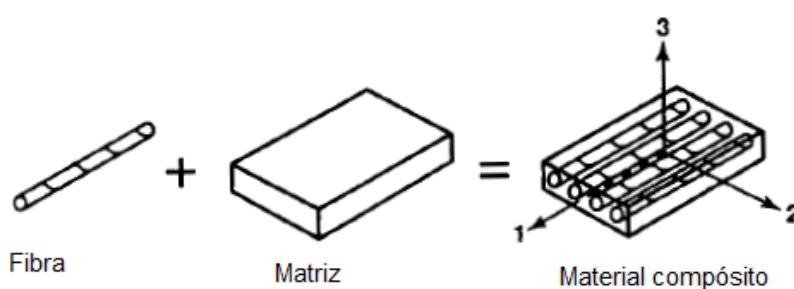
Figura 14 - Questionamentos antes da execução do projeto



Fonte: Mendonça (p.53, 2005).

Para Jones (1999), “micromecânica pode ser considerado como o estudo dos comportamentos dos materiais compósitos em que a interação dos materiais constituintes é examinada em detalhes como parte da definição do comportamento deste composto heterogêneo.” Na qual verifica-se a sua distribuição conforme Figura 15.

Figura 15 - Básico questionamento de micromecânica



Fonte: Jones (p.21, 1999). Adaptado pelo autor.

Mendonça (2005), define “a micromecânica como o estudo de interações microscópicas entre os elementos constituintes da lâmina (matriz e reforço).”

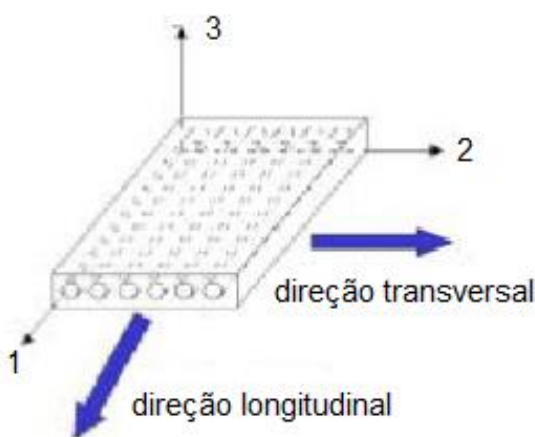
Conforme Mallick (2007), “o nível micromecânico, consiste na interação dos materiais constituintes, na qual é examinada em escala microscópica.” As equações que descrevem as características elásticas e térmicas de uma lâmina são, em geral,

baseadas em formulações micromecânicas. Uma compreensão da interação entre vários constituintes também é útil para delinear os modos de falha em um material compósito reforçado com fibra.

2.17.1 Regra da mistura

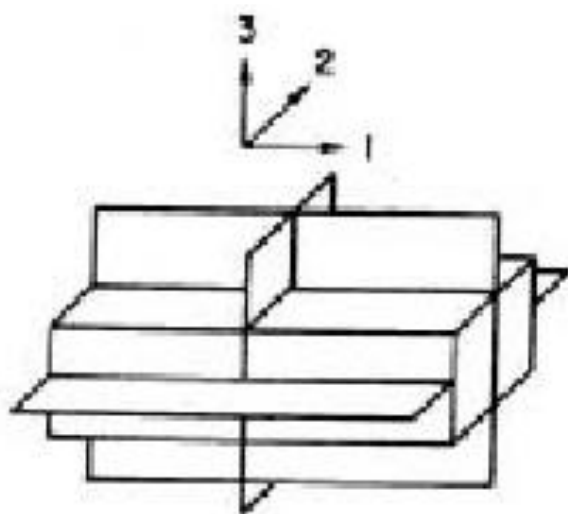
Para Tita (2006), “as propriedades dos plásticos reforçados necessitam essencialmente dos seus constituintes (resina, fibra e interface) e das suas condições de processamento geradas, cujo principal objetivo, consiste na determinação da sua propriedade mecânica, com destaque para os laminados, realizadas pela análise micromecânica.” Os plásticos reforçados laminados possuem em sua constituição varias lâminas empilhadas, na qual cada lâmina têm fibras contínuas preferencialmente orientadas em uma direção, também descrita como direção longitudinal. Por isso, a direção perpendicular à orientação das fibras é descrita como direção transversal, de acordo com a Figura 16 e 17.

Figura 16 - Lâmina direção longitudinal e transversal



Fonte: Tita⁷ (p.12,2006)

Figura 17 - Planos de ortotropia



Fonte: Tita⁷ (p.12 ,2006).

A lâmina possui três planos de simetria posicionados ortogonalmente entre si conforme Figura 14. Desta maneira, para que se possa caracterizar mecanicamente uma lâmina ortotrópica deve-se determinar nove constantes elásticas:

E_{11} = módulo de elasticidade da lâmina na direção longitudinal;

E_{22} = módulo de elasticidade da lâmina na direção transversal (paralelo ao plano da lâmina);

E_{33} = módulo de elasticidade da lâmina na direção transversal (perpendicular ao plano da lâmina);

G_{12} = módulo de cisalhamento longitudinal paralelo ao plano da lâmina (medido no plano 1-2);

G_{13} = módulo de cisalhamento transversal perpendicular ao plano da lâmina (medido no plano 1-3);

G_{23} = módulo de cisalhamento transversal perpendicular ao plano da lâmina (medido no plano 2-3);

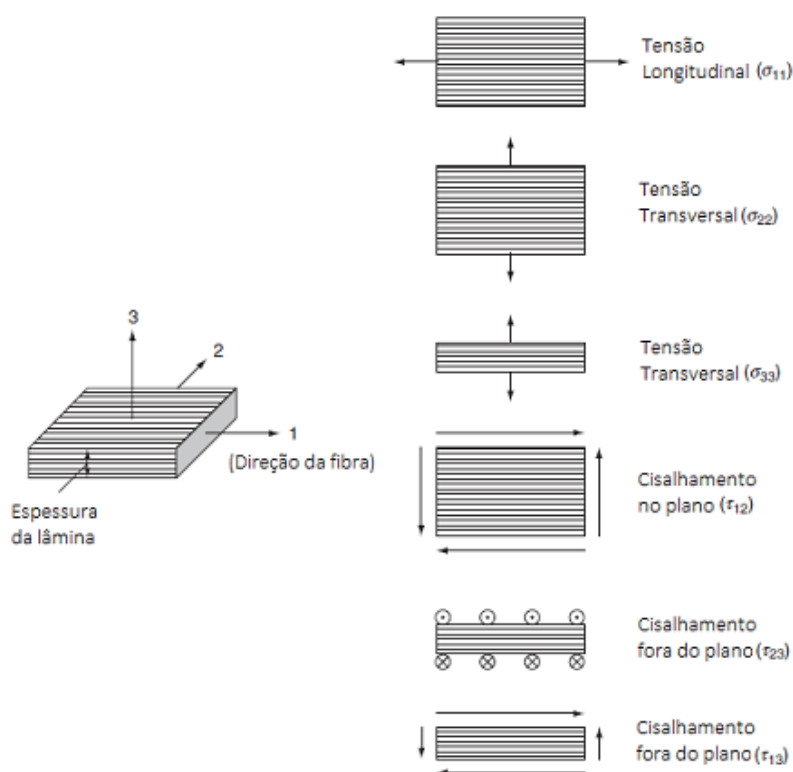
ν_{12} = coeficiente de Poisson longitudinal paralelo ao plano da lâmina (medido no plano 1-2);

ν_{13} = coeficiente de Poisson transversal perpendicular ao plano da lâmina (medido no plano 1- 3);

ν_{23} = coeficiente de Poisson transversal perpendicular ao plano da lâmina (medido no plano 2- 3).

Conforme Kaw(2006), os compósitos de fibras orientados unidirecionalmente são uma classe especial de materiais ortotrópicos. Com base nestas constantes, porém, pode-se notar também que a lâmina unidirecional ortotrópica, é transversalmente isótropa, e como demonstra à Figura 18, que representa um ponto onde as fibras estão no plano 1-2, pode-se visualizar que as propriedades elásticas são iguais na direção 2–3, $E_{22} = E_{33}$; $G_{12} = G_{13}$ e $\nu_{12} = \nu_{13}$.

Figura 18 - Carga de tração e cisalhamento em um compósito de fibra contínuo unidirecional.



Fonte: Kaw (p. 171, 2006). Adaptado do autor.

As propriedades elásticas associadas a essa lâmina são então calculadas em termos dos elementos constituintes do material compósito, bem como das proporções relativas entre matriz (resina) e reforço (fibras). Para a Regra das Misturas, necessita-se fazer as seguintes hipóteses:

- A lâmina é linear elástica e não possui tensões internas e térmicas;
- As fibras são uniformes, homogêneas, de mesmo diâmetro, contínuas, paralelas e regularmente espaçadas;
- A matriz é homogênea, isotrópica e apresenta comportamento linear elástico;
- Há uma perfeita ligação entre fibras e matriz bem como ausência de vazios;

- A interface é infinitamente fina, podendo ser desconsiderada nos cálculos.

As hipóteses apresentadas acima demonstram as limitações da Regra das Misturas para a determinação de propriedades de uma lâmina, podendo ser assim, em alguns casos, uma estimativa relativamente grosseira (TITA, 2006).

2.17.2 Frações de volume e massa, densidade e conteúdo vazio

Conforme Tita (2006), as propriedades higrotérmicas de uma lâmina unidirecional são uma função da fibra de fração do volume. As medições dos constituintes geralmente são baseadas em sua massa, então as frações de massa de fibra também devem ser definidas. Além disso, definir a densidade de um composto, também torna-se necessário porque seu valor é usado na determinação experimental do volume de fibra e frações vazias de um compósito.

Segundo Kaw (2006), um dos principais fatores que tem uma maior importância para determinar as propriedades dos plásticos reforçados é a proporção relativa resina e fibra presente na lâmina. Essa proporção pode ser fornecida como fração de massa ou volume. Pode-se considerar um componente fabricado em plástico reforçado com volume V_c e massa M_c , contendo fibras de mesmo diâmetro de volume V_f e massa M_f , volume em resina (matriz) V_m e massa M_m e também volume de vazios V_v . Nota-se que os subscritos c, f, m e v denotam compósito, fibra, matriz e vazios, respectivamente. A princípio é de extrema importância considerar as Equações 1 e 2 a seguir.

$$M_c = M_f + M_m \quad (1)$$

$$V_c = V_f + V_m + V_v \quad (2)$$

As proporções relativas de matriz e fibra são obtidas através das frações de massa ou de volume (fração volumétrica) que podem ser encontradas dividindo respectivamente as Equações 1 e 2 por M_c e V_c e ocasionar a Equação 3 abaixo.

$$I = \frac{M_f}{M_c} + \frac{M_m}{M_c} \quad (3)$$

A fim de estabelecer às relações entre as frações de massa e de volume, a densidade c do compósito deve ser determinada. Para isso pode-se ser utilizada as densidades dos elementos constituintes (fibra e matriz), com as suas frações de massa e volume. Logo, a densidade “ c ” pode ser escrita em função somente das frações de massa que são calculadas baseadas na Equação 4, ou também em função das frações volumétricas que são calculadas com referência na Equação 5 (TITA,2006). Dessa forma:

$$\rho_c = \frac{M_c}{V_c} = \frac{M_f + M_m}{V_c} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{V_c} \quad (4)$$

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (5)$$

A fração de volume de vazios V_v é expresso conforme Equação 6:

$$V_v = 1 - (V_f + V_m) \quad (6)$$

Tendo-se assim, as frações volumétricas e as frações em massa, resta apenas conhecer os valores das propriedades da fibra e da matriz, ou seja, módulo de elasticidade da matriz (E_m) e da fibra (E_f) bem como o coeficiente de Poisson da matriz (V_m) e da fibra (V_f). Geralmente essas propriedades são fornecidas pelo fabricante, no entanto, em alguns casos torna-se necessário realizar ensaios mecânicos para caracterizar a fibra ou a matriz, caso o fabricante não possua tais informações (KAW, 2006).

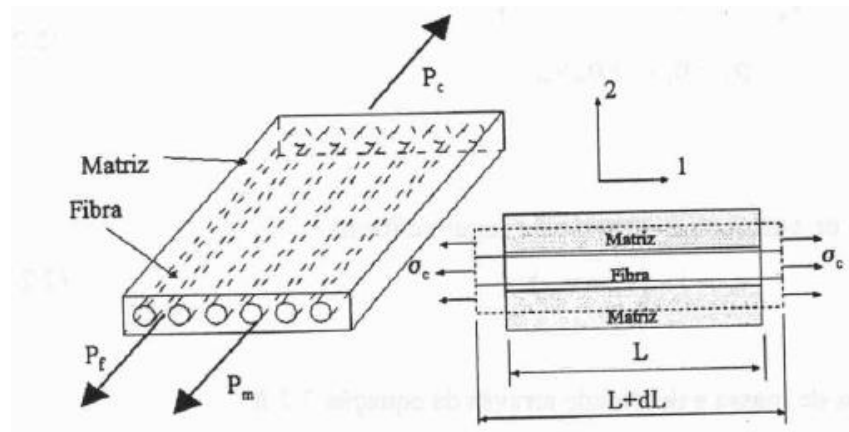
2.17.3 Módulo de elasticidade na direção longitudinal

Kaw (2006), diz que se for considerado as hipóteses impostas para o emprego da Regra das Misturas tem-se que na direção longitudinal ao se aplicar um dado carregamento P_c , as deformações das fibras, da matriz e do compósito nesta

direção serão iguais Figura 19. Dessa forma ocorre uma igualdade de acordo com a Equação 7.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (7)$$

Figura 19 - Representação de uma lâmina unidirecional carregada longitudinalmente



Fonte: Tita⁷ (p.16, 2006).

Como a fibra e a matriz apresentam comportamento elástico, as tensões são dadas pela Lei de Hooke⁸ nas Equações 8, 9 e 10.

$$\sigma_c = E_f \varepsilon_f \quad (8)$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m \quad (9)$$

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (10)$$

Desde que a lâmina apresente um comportamento elástico de tal forma que $\sigma_c = E_c \varepsilon_c$ e $\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$ tem-se as Equações 11, 12 e 13.

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c = E_f \varepsilon_f V_f + E_m \varepsilon_m V_m \quad (11)$$

A lei de Hooke é a lei da física relacionada à elasticidade de corpos, que serve para calcular a deformação causada pela força exercida sobre um corpo, tal que a força é igual ao deslocamento da massa a partir do seu ponto de equilíbrio vezes a característica constante do corpo é deformada.

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (12)$$

$$\text{ou } E_{11} = E_f V_f + E_m V_m \quad (13)$$

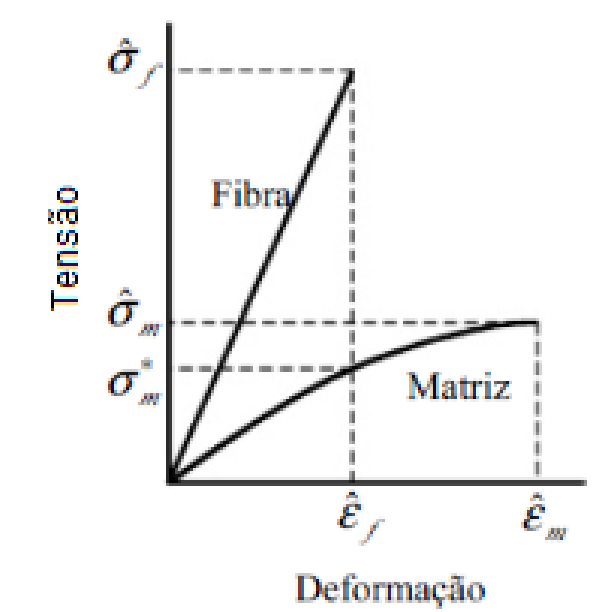
Nota-se assim, que a Regra das Misturas indica que a propriedade elástica da lâmina de um plástico reforçado é dada pela média ponderada das frações volumétricas de seus n constituintes. Deve-se ressaltar que esta formulação também possibilita a determinação do valor de resistência à tração na direção longitudinal que será representado pelo símbolo $\hat{\sigma}_1$. Para se estimar tal valor deve-se considerar a possibilidade da ocorrência do caso 1 e 2 (TITA, 2006).

1. A deformação máxima das fibras \hat{E}_f é menor que a deformação máxima da matriz \hat{E}_m ;
2. deformação máxima da matriz \hat{E}_m é menor que a deformação máxima da fibra \hat{E}_f .

Para o Caso 1, tem-se que a deformação máxima da lâmina \hat{E}_c será igual à deformação máxima das fibras, como mostra a Figura 20 e também pode-se verificar na igualdade da Equação 14 (TITA, 2006).

$$\hat{E}_c = \hat{E}_f \quad (14)$$

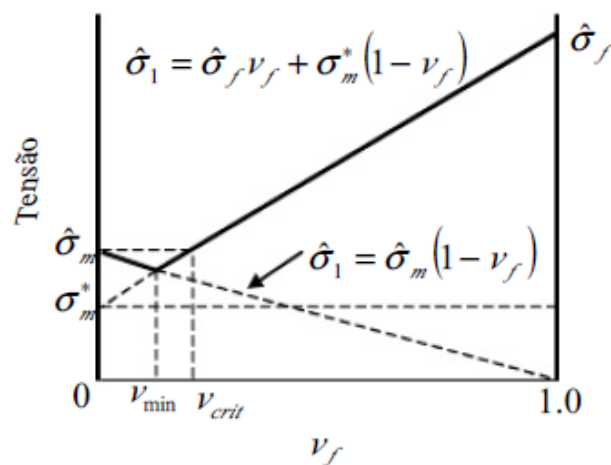
Figura 20 - Curvas tensão-deformação da fibra e da matriz para $\hat{E}_f < \hat{E}_m$



Fonte: Tita⁷ (p.18 , 2006).

Considerando que todas as fibras da lâmina possuem a mesma resistência e que tanto as fibras como a matriz tem comportamento linear elástico, onde $\hat{\sigma}_f$ corresponde ao valor de tensão de ruptura das fibras e $\hat{\sigma}_m$ ao valor da tensão que atua na matriz quando as fibras atingem o seu limite de deformação (KAW, 2006).

Figura 21 - Variação da tensão de ruptura de uma lâmina unidirecional $\hat{\sigma}_1$ com V_f para $\hat{E}_f < \hat{E}_m$



Fonte: Tita⁷ (p.19, 2006).

Pode-se notar assim pela Figura 17 que o ponto de intersecção das equações das retas, determina o volume mínimo de fibras que é dado pela Equação 15 abaixo.

$$V_{min} = V_f = \frac{\hat{\sigma}_m - \sigma_m}{\hat{\sigma}_1 + \hat{\sigma}_1 - \sigma_m} \quad (15)$$

O V_{min} é o volume mínimo de fibras para que satisfaça o efeito ortotrópico e o V_{crit} é o volume de fibras para ultrapassar o $\hat{\sigma}_m$.

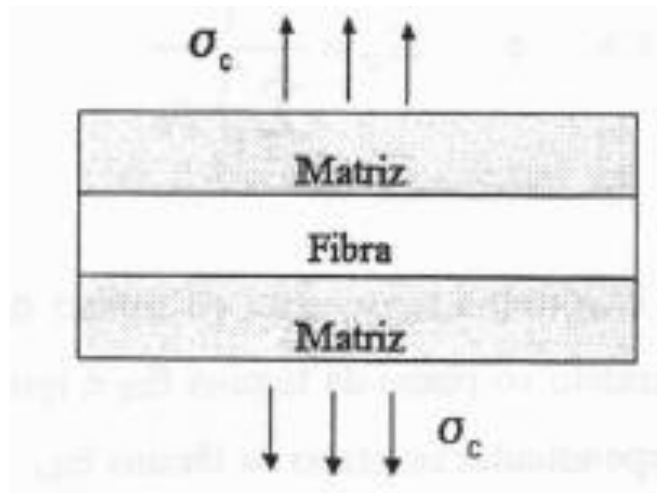
Consequentemente, para um melhor aproveitamento da resistência das fibras, a tensão de ruptura da lâmina deve ser necessariamente no mínimo igual à resistência de ruptura da matriz (TITA, 2006).

2.17.4 Módulo de elasticidade na direção transversal

Considerando as hipóteses impostas para o emprego da Regra das Misturas tem-se que na direção transversal ao se aplicar um dado carregamento “Pc”, as tensões que atuam nas fibras, na matriz e no compósito nesta direção serão iguais, Figura 22. Essa forma é expressa na igualdade da Equação 16 (KAW,2006).

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m \quad (16)$$

Figura 22 - Representação de uma lâmina unidirecional carregada transversalmente



Fonte: Tita⁷ (p.23, 2006).

Portanto, a elongação transversal da lâmina de compósito δ_c é dada pela soma das elongações das fibras δ_f e da matriz δ_m , conforme igualdade da equação 17.

$$\delta_c = \delta_f = \delta_m \quad (17)$$

Porém como $\varepsilon = \delta / t$ onde t é a espessura do constituinte ou do compósito, conforme Equação 18, tem-se que:

$$E_c t_c = E_f t_f + E_m t_m \quad (18)$$

Devido às tensões que atuam na direção transversal às fibras são iguais as que atuam na direção transversal à matriz, pode-se descrever as deformações de acordo com as Equações 19, 20, 21 e 22 (KAW,2006)

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_c}{E_f} \quad (19)$$

$$\text{e} \quad \varepsilon_m = \frac{\sigma_c}{E_m} \quad (20)$$

$$\varepsilon_{22} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i V_i \quad (21)$$

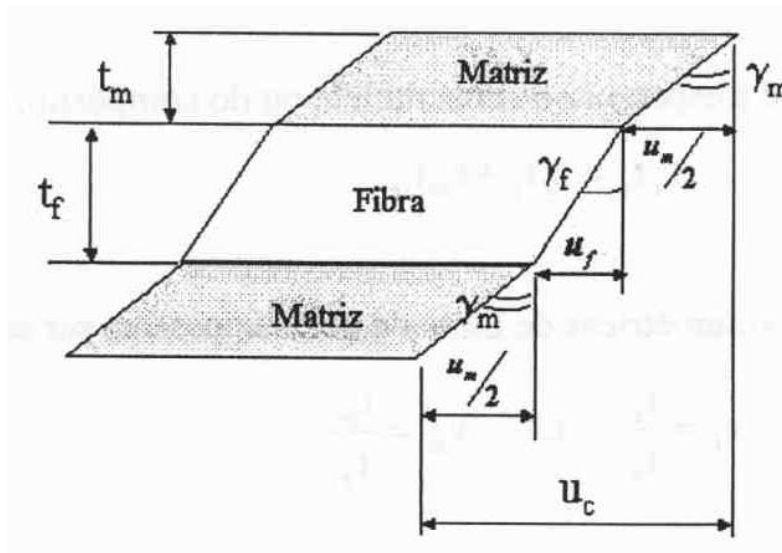
$$E_{22} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} V_i} \quad (22)$$

Deve ser lembrado o fato da isotropia transversal de uma lâmina que o módulo de elasticidade desta, na direção transversal paralelo ao seu plano E_{22} é igual ao módulo de elasticidade da lâmina na direção transversal perpendicular ao plano da lâmina E_{33} (TITA, 2006).

2.17.5 Módulos de cisalhamento

Para determinar o módulo de cisalhamento da lâmina considera-se que as deformações por cisalhamento são lineares e que as tensões atuantes nas fibras e na matriz são iguais, como mostra a Figura 23 (TITA, 2006).

Figura 23 - Representação de uma lâmina unidirecional carregada sob tensão de cisalhamento



Fonte: Tita⁷ (p.24, 2006).

Além disso, o deslocamento total da lâmina u_c será dado pela soma dos deslocamentos das fibras u_f e da matriz u_m , de acordo com a Equação 23.

$$u_c = t_f \gamma_f + t_m \gamma_m \quad (23)$$

Onde γ considerado com a distorção angular da fibra ou da matriz.

Considerando que as tensões de cisalhamento que atuam nas fibras, na matriz e no compósito são iguais, se substituir as relações, apresenta-se que o módulo de cisalhamento longitudinal paralelo ao plano da lâmina (medido no plano 1-2) será obtido pela Equação 24 (KAW, 2006).

$$\frac{1}{G_{12}} = V_f \frac{1}{G_f} + V_m \frac{1}{G_m} = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{G_i} \quad (24)$$

De acordo com a isotropia transversal da lâmina, pode-se afirmar que G_{12} é igual a G_{13} (módulo de cisalhamento transversal perpendicular ao plano da lâmina e medido no plano 1-3). Entretanto, o valor de G_{23} que é módulo de cisalhamento

transversal perpendicular ao plano da lâmina (medido no plano 2-3) necessita ser determinado. Porém, tem-se a seguinte relação verificada na Equação 25 (TITA, 2006).

$$G_{23} = \frac{E_{33}}{2(1+\nu)_{23}} = \frac{E_{22}}{(2)1+\nu_{23}} \quad (25)$$

Sendo assim, torna-se necessária à determinação do coeficiente de Poisson⁹ ν_{23} e do módulo de elasticidade E_{22} para que este módulo de cisalhamento seja calculado. Dessa forma, segue assim as hipóteses e as equações necessárias para obtenção dos coeficientes de Poisson (KAW, 2006).

2.17.6 Coeficientes de Poisson⁹

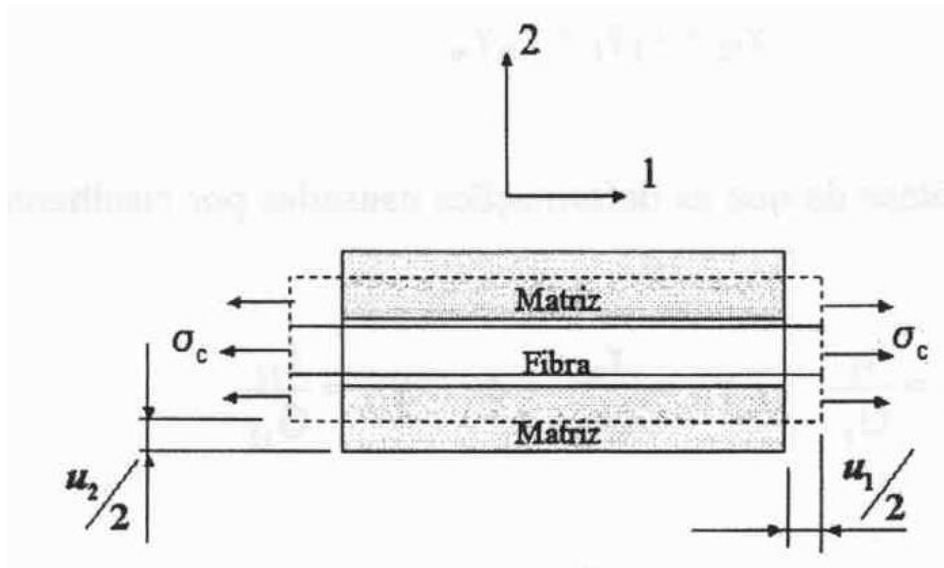
Se uma tensão σ_c for aplicada na direção longitudinal às fibras haverá uma contração da lâmina na direção transversal, como ilustra a Figura 24. Essa contração poderá ser expressa pela soma das contrações das fibras juntamente com a contração da matriz, demonstrada na Equação 26 (TITA, 2006).

$$u_2^c = u_2^f + u_2^m \quad (26)$$

9

O coeficiente de Poisson, ν , mede a deformação transversal (em relação à direção longitudinal de aplicação da carga) de um material homogêneo e isotrópico. A relação estabelecida é entre deformações ortogonais.

Figura 24 - Determinação do coeficiente de Poisson



Fonte: Tita⁷ (p.26, 2006).

Como coeficiente de Poisson longitudinal paralelo ao plano da lâmina (medido no plano 1-2) ν_{12} é dado pela relação $-E_{22}/E_{11}$, tem-se a Equação 27.

$$\nu_{12} = \frac{-E_{22}}{E_{11}} = \nu_m V_m + \nu_f V_f = \sum_{i=1}^n \nu_i V_i \quad (27)$$

Conforme a isotropia transversal da lâmina, pode se afirmado que ν_{12} é igual a ν_{13} (coeficiente de Poisson transversal perpendicular ao plano da lâmina e medido no plano 1-3). Entretanto, o valor de ν_{23} que é o coeficiente de Poisson transversal perpendicular ao plano da lâmina (medido no plano 2-3) necessita ser determinado. Porém, a determinação de tal coeficiente é relativamente complexa, sendo apresentadas na literatura diferentes formas de cálculo. Uma forma relativamente aceita foi apresentada por Whitney, Daniel e Pipes (1984) de acordo com a Equação 28, onde:

$$\nu_{23} = \frac{2 E_{11} K_{12} - E_{11} E_{22} - 4 V_{12}^2 K_{12} E_{22}}{2 E_{11} K_{12}} \quad (28)$$

O valor K_{12} consiste no módulo volumétrico da lâmina medido no plano 1-2 e pode ser obtido através da Equação 29.

$$K_{12} = \frac{E_1 E_2}{2(E_1 + E_2)} \quad (29)$$

2.18 Análise macromecânica dos laminados

Para Mallick (2007), o nível de macromecânica, no qual a resposta de um material compósito reforçado com fibra a cargas mecânicas e térmicas é examinada em uma escala macroscópica. Considera-se que o material é homogêneo. As equações de elasticidade ortotrópica são usadas para calcular tensões, deformações e deflexões.

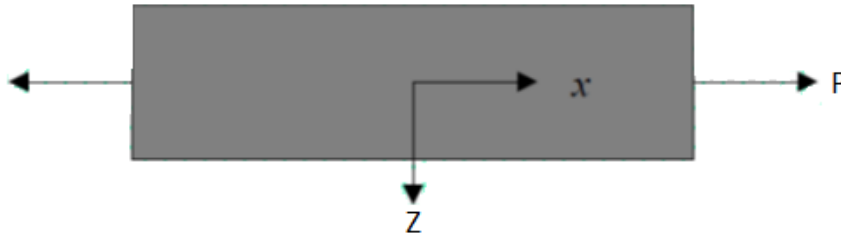
De acordo com Jones (1999), o conceito de macromecânica é o estudo do comportamento do material compósito na qual material é presumidamente homogêneo e os efeitos dos materiais constituintes são detectados apenas como as médias das propriedades macroscópicas.

Conforme Agarwal (1999), a abordagem macromecânica consiste em analisar o comportamento da estrutura, ou seja, o comportamento mecânico do laminado que é constituído por uma sequencia de lâminas empilhadas.

2.18.1 Tensão – Deformação para uma viga isotrópica

Considere um feixe prismático de seção transversal A sob uma carga axial aplicada P conforme Figura 25.

Figura 25 - Feixe prismático seção transversal A.



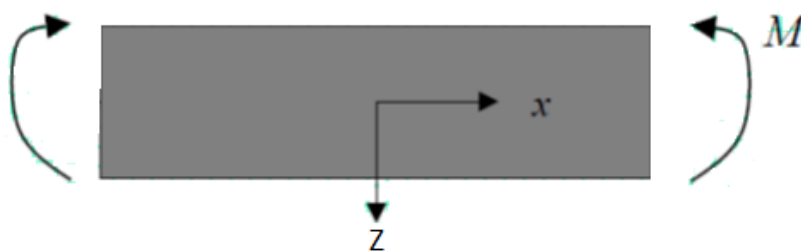
Fonte: P.Joyce (p.3, 2003). Adaptado do Autor.

$$\sigma_{xx} = \frac{P}{A} \quad (30)$$

$$\epsilon_{xx} = \frac{P}{EA} \quad (31)$$

Assume-se que a tensão e deformação normais são uniformes e constantes no raio e são dependentes da carga P que está sendo aplicada no centróide da seção transversal. Considere o mesmo feixe prismático em um momento de flexão puro M , onde o feixe é assumido inicialmente reto e as cargas aplicadas passam por um plano de simetria para evitar torção conforme ilustrada na Figura 26 (KAW, 2006).

Figura 26 - Feixe prismático seção transversal A.



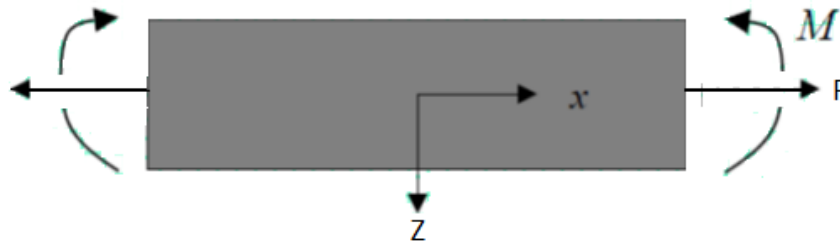
Fonte: P. Joyce (p.4, 2003). Adaptado pelo autor.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{Z}{\rho} \quad (32)$$

$$e \sigma_{xx} = \frac{Mz}{I} \quad (33)$$

Neste caso é ignorado o cisalhamento transversal e as secções do plano de ensaios permanecem planas. É o segundo momento da área (muitas vezes, erroneamente referido como o momento de inércia), e por último deve-se considerar o feixe sob carga combinada conforme Figura 27 (TITA, 2006).

Figura 27 - Feixe prismático sob carga combinada.



Fonte: P. Joyce (p.5, 2003). Adaptado pelo autor.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{P}{EA} + \frac{Mz}{EI} \quad (34)$$

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_0 + z \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad (35)$$

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_0 + zK \quad (36)$$

Onde ε_0 está a tensão em $y = 0$ (através do centróide), e κ = a curvatura do feixe.

2.18.2 Equações de deslocamento de tensão para um laminado anisotrópico

A Teoria da Laminação Clássica (CLT) é utilizada para desenvolver relacionamentos semelhantes em 3D para um laminado (placa) sob forças de

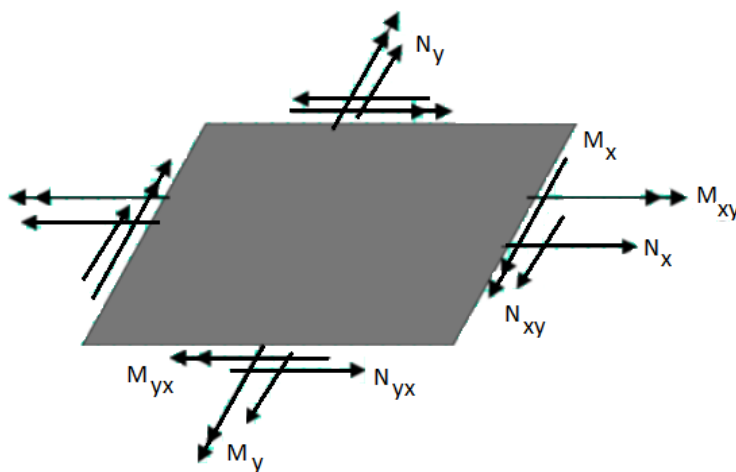
cisalhamento e axial combinadas e momentos de flexão e torção (P. JOYCE, 2003).

Os seguintes pressupostos são feitos para desenvolver as relações:

- Cada uma das lâminas são homogêneas e ortotrópicas;
- O laminado é fino e é carregado apenas no plano;
- Os deslocamentos são contínuos e pequenos em todo o laminado;
- Cada lâmina é elástica (as relações tensão-deformação são lineares);
- Não ocorre deslizamento entre as interfaces de lâminas;

As tensões de cisalhamento transversais e a tensão normal transversal são insignificantes. Considere o caso geral de uma placa sob cisalhamento no plano e carregamento axial, bem como momentos de flexão e torção conforme na Figura 28.

Figura 28 - Placa sob cisalhamento no plano.



Fonte: P. Joyce(p.7, 2003), Adaptado pelo autor.

Pode ser derivada a seguinte equação de deslocamento de tensão de acordo com a Equação 37.

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x^0 \\ E_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (37)$$

Na qual $\begin{bmatrix} E_x^0 \\ E_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix}$ podem ser considerados como as tensões do meio do plano, e

$\begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$ são definidas como as curvaturas do meio do plano.

2.18.3 Tensão - Deformação no laminado

Quando as tensões são conhecidas em qualquer ponto ao longo da espessura do laminado, a equação tensão-deformação calcula as tensões globais em cada lâmina, conforme Equação 38 (KAW,2006).

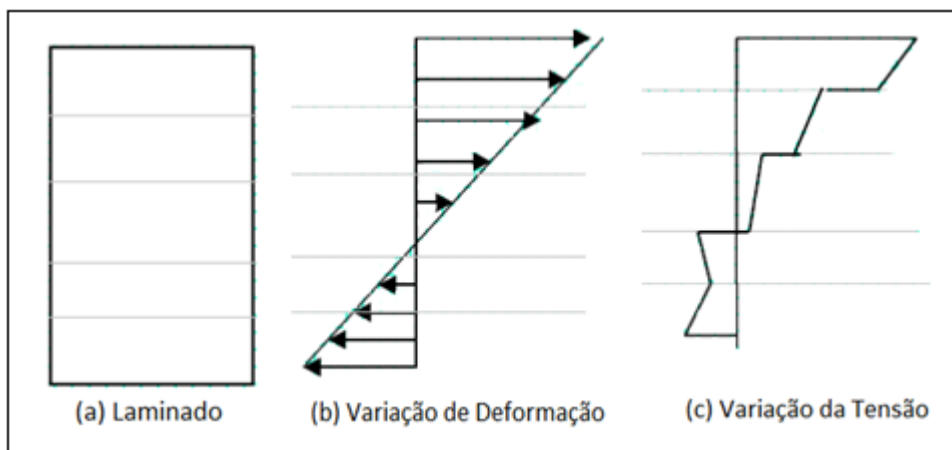
$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{xs} & Q_{ys} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (38)$$

Na qual a matriz de rigidez transformada reduzida, Q_{xy} corresponde à da camada localizada no ponto ao longo da espessura do laminado. Se for substituída pelos resultados anteriores obtém-se a seguinte Equação 39 (matriz) (P.JOYCE, 2003).

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{xs} & Q_{ys} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{xs} & Q_{ys} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Os tipos de modelos estratificados com as distribuições das tensões podem ser descritos conforme Figura 29.

Figura 29 - Modelos estratificados (a) Laminado, (b) variação de deformação e (c) variação de tensão



Fonte: P. Joyce (p.9, 2003).

As tensões podem variar linearmente apenas através das espessuras de cada lâmina, estas podem saltar de uma para outra, uma vez que a matriz de rigidez reduzida transformada muda de camada para camada. Essas tensões globais podem então ser transformadas em tensões locais através da equação de Transformação. Da mesma maneira, as tensões locais podem ser transformadas em tensões globais (KAW,2006).

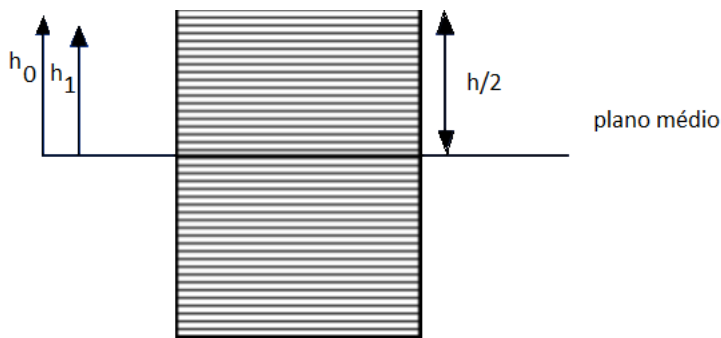
2.18.4 Força e momento resultante

As tensões em cada lâmina podem ser integradas para dar forças e momentos resultantes (ou forças e momentos aplicados). Como as forças e os momentos aplicados a um laminado serão conhecidos, as tensões do meio plano e as curvaturas da placa podem ser encontradas. Considere um laminado feito de n camadas conforme Figura 26, na qual cada camada tem uma espessura t_k . A localização do plano médio é $h / 2$ a partir da superfície superior ou inferior. A coordenada z de cada superfície da camada é dada pelas Equações 40 e 41 (P. JOYCE, 2003).

$$h_0 = \frac{h}{2} \text{ (superior da superfície).} \quad (40)$$

$$h_1 = \frac{h}{2} - t_1 \text{ (inferior da superfície).} \quad (41)$$

Figura 30 - Tensões em cada lâmina.



Fonte: P. Joyce (p.11, 2003). Adaptado pelo autor.

A integração das tensões globais em cada lâmina obtém-se as forças resultantes por unidade de comprimento no plano x-y através da espessura do laminado como nas Equações 42, 43, 44, 45, 46 e 47. (KAW, 2006)

$$N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz \quad (42)$$

$$N_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz \quad (43)$$

$$N_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{yx} dz \quad (44)$$

$$M_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz \quad (45)$$

$$M_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz \quad (46)$$

$$M_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{yx} z dz \quad (47)$$

Onde N_x, N_y = força normal / comprimento da unidade, N_{xy} = força de cisalhamento / comprimento da unidade, M_x, M_y = momento de flexão / comprimento da unidade e M_{xy} = momento de torção / comprimento da unidade.

Da mesma forma, a integração das tensões em cada lâmina obtém-se os momentos resultantes por unidade de comprimento no plano x-y através da espessura do laminado (P. JOYCE,2003).

Pode-se utilizar na forma de matriz conforme a Equação 48.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz \quad \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (48)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} z dz \quad \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} z dz \quad (49)$$

Ou seja, a Equação 48 representa as forças aplicadas nos laminados, enquanto que a Equação 49 são os momentos aplicados nos laminados.

E substituída a mesma, com a Equação (38).

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{xs} & Q_{ys} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (38)$$

As forças e momentos resultantes podem ser escritos em termos das tensões do meio plano e curvaturas de acordo com as Equações 50 e 51 (KAW,2006).

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{xs} & Q_{ys} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x^0 \\ E_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} dz + \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{xs} & Q_{ys} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} z dz \quad (50)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{xs} & Q_{ys} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x^0 \\ E_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} z dz + \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{xs} & Q_{ys} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} z^2 dz \quad (51)$$

Uma vez que as tensões do meio plano e as curvaturas da placa são independentes da coordenada z e a matriz de rigidez reduzida transformada é uma constante para cada camada, obtém-se a Equação 52 (P.JOYCE, 2003).

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left\{ \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{xs} & Q_{ys} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz + \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{xs} & Q_{ys} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right\} \quad (52)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left\{ \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{xs} & Q_{ys} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz + \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{xs} & Q_{ys} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 dz \right\} \quad (53)$$

A partir da geometria (e um pouco de cálculo) podemos resolver as seguintes integrais:

$$\int_{h_{k-1}}^{h_k} dz = (h_k - h_{k-1}) \quad (54)$$

$$\int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz = (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (55)$$

$$\int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 dz = 1/3 (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (56)$$

Além disso, apenas a rigidez é única para cada camada k . Assim, $[\varepsilon^0]_{x,y}$ e $[K]_{x,y}$ podem ser considerados fora do sinal de soma, tal qual a Equação 57 e 58 (KAW, 2006)

$$[N]_{x,y} = \left[\sum_{k=1}^n [Q]_{x,y}^k (h_k - h_{k-1}) \right] [\varepsilon^0]_{x,y} + \left[\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [Q]_{x,y}^k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \right] [K]_{x,y}$$

(57)

$$[M]_{x,y} = \left[\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [Q]_{x,y}^k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \right] [\epsilon^0]_{x,y} + \left[\frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [Q]_{x,y}^k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \right] [K]_{x,y}$$

(58)

Com base nestas duas equações pode-se definir que:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [Q]_{x,y}^k (h_k - h_{k-1}), \quad (59)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [Q]_{x,y}^k (h_k^2 - h_{k-1}^2), \quad (60)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [Q]_{x,y}^k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (61)$$

Onde, os valores de [A], [B], [D] são chamados de extensão, separação e flexão matrizes de rigidez, respectivamente.

2.18.5 Análise de um laminado compósito

Conforme as Equações 62 e 63 dadas abaixo,

$$\epsilon \quad (62)$$

$$\epsilon \quad (63)$$

Pode ser combinada uma expressão geral para a análise composta laminada que relaciona as forças e os momentos no plano com as tensões e curvas do plano médio, obtem-se a Equação 64 (P.JOYCE,2003).

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x^0 \\ E_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (64)$$

A matriz de rigidez extensional [A] relaciona a força resultante com as tensões no plano. A matriz de rigidez de flexão [D] relaciona os momentos de flexão resultantes com as curvaturas da placa. A matriz de rigidez do acoplamento [B] relaciona os termos de força e momento com as tensões do meio plano e as curvaturas do plano médio.

2.18.6 Casos especiais de laminados

Casos especiais de laminados podem ser considerados quando a simetria: [B] = 0, na qual a equação de deformação-carga e relação momento-curvatura é separada, ou se o balanceamento: $A_{16} = A_{26} = 0$ e se é simétrico e equilibrado, caso seja considerado ortotrópico em relação ao comportamento do plano, conforme Equações 65 e 66 abaixo (KAW,2006).

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{12} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$N_{xy} = A_{66} \gamma_{xy}^0 \quad (66)$$

Pode ser utilizado o cruzamento de camadas: $A_{16}=A_{26}=B_{16}=B_{26}=D_{16}=D_{26}=0$.
Alguna dissociação das seis equações, conforme Equação 67 e 68 a seguir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ M_x \\ M_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & B_{11} & B_{12} \\ A_{12} & A_{22} & B_{12} & B_{22} \\ B_{11} & B_{12} & D_{11} & D_{12} \\ B_{12} & B_{22} & D_{12} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x^0 \\ E_y^0 \\ K_x^0 \\ K_y^0 \end{bmatrix} \quad (67)$$

$$\begin{bmatrix} N_{xy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{66} & B_{66} \\ B_{66} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{xy}^0 \\ K_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (68)$$

Onde é considerado ortotrópico em relação ao comportamento no plano e de flexão.

De acordo com a simetria do cruzamento da camada tem-se que:

$$[B]=0$$

$$A_{16}=A_{26}=D_{16}=D_{26}=0$$

Então a dissociação significativa por ser descrita conforme Equação 69, 70, 71 e 72.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{12} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \end{bmatrix} \quad (69)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{12} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x^0 \\ K_y^0 \end{bmatrix} \quad (70)$$

$$N_{xy} = A_{66} \gamma_{xy}^0 \quad (71)$$

$$M_{xy} = D_{66} K_{xy}^0 \quad (72)$$

Para realizar uma análise de um compósito laminado submetido a forças e momentos aplicados devem ser feitos realizados os passos 1 à 8 conforme descritos abaixo (P. JOYCE, 2003).

1. Encontrar os valores da matriz de rigidez reduzida $[Q_{ij}]$ para cada camada;
2. Encontrar o valor da matriz de rigidez reduzida transformada $[Q_{xy}]$;

3. Encontrar as coordenadas das superfícies superior e inferior de cada camada;
4. Encontrar as 3 matrizes de rigidez [A], [B] e [D];
5. Calcular as tensões e curvaturas do meio plano usando as 6 equações simultâneas (substituir os valores da matriz de rigidez e as forças e momentos aplicados);
6. Conhecer a localização z de cada camada e calcular as suas tensões globais;
7. Usar a equação de tensão-deformação para encontrar as tensões globais;
8. Usar a equação de Transformação para encontrar as deformações e tensões locais.

2.18.7 Conformidades dos laminados

Uma vez que os laminados multidirecionais são caracterizados por descontinuidades de tensões de camada à camada, é preferível trabalhar com deformações que são contínuas através da espessura. Por este motivo, é necessário inverter as relações de deformação e expressar tensões e curvaturas em função de cargas e momentos aplicados (KAW,2006).

Caso realizadas as inversões das matrizes, utiliza-se a Equação 64, e obtem-se a Equação 73.

$$\begin{bmatrix} E_x^0 \\ E_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} & b_{11} & b_{12} & b_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} & b_{12} & b_{22} & b_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} & b_{16} & b_{26} & b_{66} \\ c_{11} & c_{12} & c_{16} & d_{11} & d_{12} & d_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{26} & d_{12} & d_{22} & d_{26} \\ c_{16} & c_{26} & c_{66} & d_{16} & d_{26} & d_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} \quad (73)$$

Ou mais simplificada como na Equação 74:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} \quad (74)$$

Onde [a], [b], [c] e [d] são o laminado extensional, união e matrizes de conformidade de flexão obtidas de acordo com as Equações 75, 76, 77, 78 e 79.

$$[a] = [A]^{-1} - ([B^i][D^i]^{-1})[C^i] \quad (75)$$

$$[b] = [B^i][D^i]^{-1} \quad (76)$$

$$[c] = -[D^i]^{-1}[C^i] \quad (77)$$

além disso,

$$[c] = [b]^T \quad (78)$$

$$[d] = [D^i]^{-1} \quad (79)$$

Pode-ser verificar também que:

$$[B^i] = -[A]^{-1}[B] \quad (80)$$

$$[C^i] = [B][A]^{-1} \quad (81)$$

$$[D^i] = [D] - ([B][A]^{-1})[B] \quad (82)$$

Deve-se observar que as complicações que relacionam as tensões do meio do plano com os momentos aplicados não são idênticos aos que relacionam curvaturas com cargas no plano (P.JOYCE,2003).

2.18.8 Constantes de engenharia para um laminado multi-axial

A partir dos comprimentos dos laminados, pode-se calcular constantes de engenharia, tais como nas Equações 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90 e 91.

$$\dot{E}_x = \frac{1}{ha_{xx}} \quad (83)$$

$$\dot{E}_y = \frac{1}{ha_{yy}} \quad (84)$$

$$\dot{G}_{xy} = \frac{1}{ha_{ss}} \quad (85)$$

$$\dot{V}_{xy} = \frac{-a_{yx}}{a_{xx}} \quad (86)$$

$$\dot{V}_{xy} = \frac{-a_{xy}}{a_{yy}} \quad (87)$$

$$\dot{\eta}_{sx} = \frac{a_{xs}}{a_{ss}} \quad (88)$$

$$\dot{\eta}_{xs} = \frac{a_{sx}}{a_{xx}} \quad (89)$$

$$\dot{\eta}_{ys} = \frac{a_{sy}}{a_{yy}} \quad (90)$$

$$\dot{\eta}_{sy} = \frac{a_{ys}}{a_{ss}} \quad (91)$$

Assim como na lâmina unidirecional (UD), a simetria implica também conforme equação 92.

$$\frac{\dot{V}_{xy}}{\dot{E}_x} = \frac{\dot{V}_{yx}}{\dot{E}_y}, \quad \frac{\dot{\eta}_{xs}}{\dot{E}_x} = \frac{\dot{\eta}_{sx}}{\dot{G}_{xy}}, \quad \frac{\dot{\eta}_{ys}}{\dot{E}_y} = \frac{\dot{\eta}_{sy}}{\dot{G}_{xy}} \quad (92)$$

Para realizar um procedimento computacional com a finalidade da determinação das propriedades engenharia elástica, deve ser realizada as etapas 1 à 9, conforme descritas a seguir (P.Joyce, 2003):

1. Determinar as constantes de engenharia da camada UD, E_1 , E_2 , ν_{12} e G_{12} ,
2. Calcular a rigidez das camadas nos principais eixos materiais, Q_{11} , Q_{22} , Q_{12} , e Q_{66} ;
3. Digitar a orientação da fibra de cada camada, k ;
4. Calcular a rigidez transformada $[Q]_{x,y}$ de cada camada, k ;
5. Digitar as coordenadas de espessura transversal das superfícies da camada;
6. Calcular as matrizes de rigidez laminada $[A]$, $[B]$ e $[D]$;
7. Calcular a matriz de conformidade de laminado $[a]$;
8. Digitar a espessura total do laminado, h ;
9. Calcular as propriedades de engenharia laminada em eixos globais, x , y .

2.19 Envelope de Falhas

O envelope de falhas é um gráfico tridimensional das combinações das tensões normais e de cisalhamento que podem ser aplicadas a uma lâmina de ângulo imediatamente antes da falha. Como o desenho de gráficos tridimensionais pode ser demorado, pode-se desenvolver envelopes de falha para tensão de cisalhamento constante τ_{xy} e, em seguida, usar as duas tensões normais σ_x e σ_y como os dois eixos. Então, se a tensão aplicada estiver dentro do envelope de falha, a lâmina estará segura; caso contrário, ocorre a falha (KAW,2006).

2.20 Critérios de falha

Segundo Kaw (2006), várias teorias foram desenvolvidas para estudar as falhas de uma lâmina angular. As teorias são geralmente baseadas nas forças

normais e de cisalhamento de uma lâmina unidirecional. Um material isotrópico, como o aço, geralmente possui dois parâmetros de força: força normal e resistência ao cisalhamento. Em alguns casos, como concreto ou ferro fundido cinzento, as forças normais são diferentes na tensão e compressão. Uma simples teoria da falha para um material isotrópico é baseada em encontrar as principais tensões normais e de cisalhamento máximas. Essas tensões máximas, se forem maiores a qualquer das forças superiores correspondentes, indicam falha no material. Com os dados de tensão e deformação nas direções principais e as propriedades das lâminas, consegue-se utilizar critérios de falha para desenvolver e dimensionar um laminado. Atualmente, os critérios de falha mais utilizados são: máxima tensão, máxima deformação e *Tsai-Hill*¹⁰.

A análise de projeto de uma estrutura ou de um componente é realizada pela comparação de tensões (ou de deformações) devido a cargas aplicadas com a resistência permitida (ou capacidade de deformação) do material. No caso de campos de tensão biaxial ou multiaxial, uma teoria de falha adequada é usada para essa comparação. Para um material isotrópico que apresenta rendimento, tal como um aço macio ou uma liga de alumínio, a teoria de tensão máxima de cisalhamento ou a teoria de energia distorcional (critério de rendimento de Von Mises¹¹) é comumente usada para o processo produtivo. Os polímeros reforçados com fibras não são isotrópicos nem exibem rendimento bruto. Assim, as teorias de falha desenvolvidas para metais ou outros materiais isotrópicos não são aplicáveis a

10

¹⁰ *Tsai-Hill* : Este critério leva em consideração a parte de energia de distorção da energia de deformação total que é armazenada devido ao carregamento. A energia de distorção é a parte da energia de deformação que causa alteração de forma. A outra parte é a energia de dilatação, que causa a alteração de volume (alteração de área, no caso bidimensional) devido ao carregamento.

11

O critério de falha de Von Mises indica que o escoamento de um material sólido inicia quando o segundo invariante deviatório de tensão, atinge um valor crítico. O critério é por esta razão algumas vezes denominado teoria de escoamento. É parte de uma teoria da plasticidade melhor aplicável a materiais dúcteis, como os metais. Antes do escoamento a resposta do material é assumida ser elástica.

materiais compósitos. Em vez disso, muitas novas teorias de falha foram propostas para compósitos reforçados com fibra, tais como: máxima deformação, máxima tensão e *Tsai-Hill* (MALLICK,2007).

2.20.1 Tensão máxima

Para Kaw (2006), esta teoria é baseada na teoria da tensão máxima normal por St. Venant e a teoria máxima de tensão de corte por Tresca aplicada a isotrópicos materiais. As estirpes aplicadas a uma lâmina são resolvidas a tensões no local dos eixos. A falha é prevista em uma lâmina, se alguma das tensões normais ou de corte nos eixos locais for igual ou superior a tensão final correspondente final das lâminas unidirecionais.

“Conforme a teoria da máxima tensão, a falha pode ocorrer quando qualquer tensão nas principais direções dos materiais são iguais ou superiores às correspondentes força máxima. Assim, para evitar falhas, para o caso simples de carga de tensão uniaxial na direção x, apenas xx é presente e yy para txy = 0” (MALLICK, 2007).

“Para o critério de falha por máxima tensão, a falha do material compósito acontece no instante na qual qualquer tensão nas direções principais for igual ou maior que a tensão admissível assumida pela lâmina” (NAIK et al., 2005). Desta forma a lâmina irá falhar quando qualquer das situações das Equações 93, 94, 95, 96, 97 ou 98 ocorrer.

$$\sigma_1 \geq \sigma_{1ut} \quad (93)$$

$$\text{ou } \sigma_1 \geq \sigma_{1uc} \quad (94)$$

$$\sigma_2 \geq \sigma_{2ut} \text{ ou } \quad (95)$$

$$\sigma_2 \geq \sigma_{2uc} \quad (96)$$

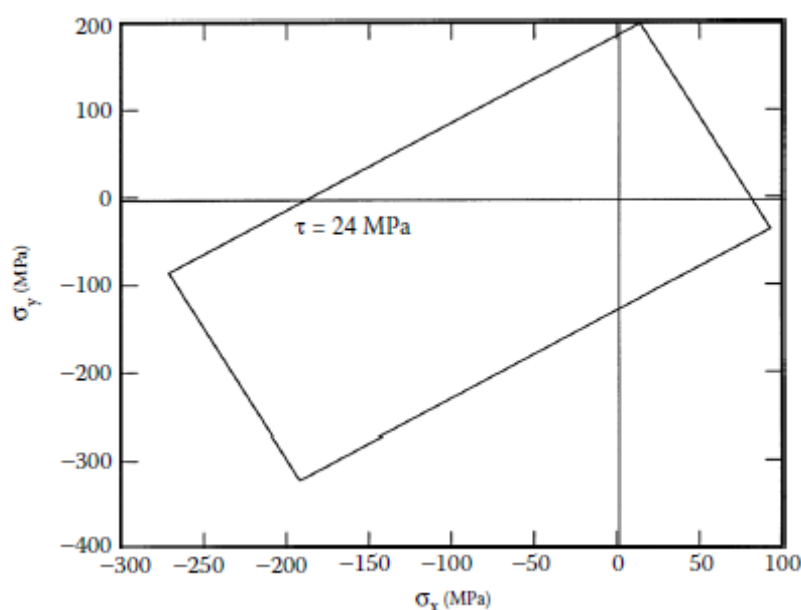
$$\tau_{12} \geq +\tau_{12} \quad (97)$$

$$\text{ou } \tau_{12} \geq -\tau_{12} \quad (98)$$

Onde: σ_1 , σ_2 , τ_{12} , σ_{1ut} , σ_{2ut} , σ_{1uc} , σ_{2uc} e τ_{12u} , tensão longitudinal, tensão transversal, tensão de cisalhamento, resistência longitudinal à tração, resistência transversal à tração, resistência longitudinal à compressão, resistência transversal à compressão e resistência ao cisalhamento respectivamente.

A Figura 31 demonstra um exemplo característico de falha envolvendo a tensão máxima.

Figura 31 - Envelope com falha para tensão de cisalhamento constante usando a teoria de falha tensão máxima.



Fonte: Kaw (p.147, 2006).

2.20.2 Máxima deformação

Conforme Kaw (2006), relacionado com a teoria normal máxima de deformação por Rankine e a máxima Teoria da deformação por Tresca, possuem semelhanças àquelas aplicadas aos materiais isotrópicos. As deformações que atuam sobre uma lâmina são resolvidos nas tensões normais e de cisalhamento nos

eixos locais. A falha está prevista em uma lâmina, se alguma destas deformações normais ou de cisalhamento nos eixos locais for igual ou superior às forças finais correspondentes das lâminas unidirecionais.

“De acordo com a teoria da deformação máxima, a falha ocorre quando qualquer as principais direções do material são iguais ou maiores que as correspondentes deformações finais” (MALLICK, 2007).

“Muito semelhante ao critério de máxima tensão, a máxima deformação descreve que ocorrerá algum tipo de falha em um material compósito, quando quaisquer das deformações, cisalhantes ou normais, nos principais eixos da lâmina exceder ou igualar as suas máximas deformações correspondentes”. Desta forma, para que não aconteça falha, as deformações necessariamente devem atender às Inequações 99, 100 e 101 (NAIK et al., 1999).

$$-\varepsilon_{1uc} < \varepsilon_1 < \varepsilon_{1ut} \quad (99)$$

$$-\varepsilon_{2uc} < \varepsilon_2 < \varepsilon_{2ut} \quad (100)$$

$$-\gamma_{12u} < \gamma_{12} < \gamma_{12u} \quad (101)$$

Onde: ε_1 , ε_2 , γ_{12} , ε_{1uc} , ε_{1ut} , ε_{2uc} , ε_{2ut} e γ_{12u} , deformação longitudinal, deformação transversal, deformação de cisalhamento, deformação longitudinal última em compressão, deformação longitudinal última em tração, deformação transversal última em compressão, deformação transversal última em tração e deformação última em cisalhamento respectivamente (NAIK et al., 1999).

2.20.3 Critério de *Tsai-Hill*

De acordo com Kaw (2006), esta teoria é baseada na falha de energia de distorção de Von Misesⁱ, cujo estudo é o critério de rendimento de energia distorcida para materiais isotrópicos aplicados aos anisotrópicos. A energia de distorção é realmente uma parte da energia de deformação total em um corpo, na qual um corpo consiste em duas partes; um devido a uma mudança de volume chamada de

energia de dilatação e a segunda é devido a uma alteração da forma designada como sendo de distorção. Pode-se dizer que a falha no material ocorre apenas quando a energia de distorção é maior que a do material. Com base no critério de falha de energia distorsional de Von Mises para materiais isotrópicos, o critério de falha de *Tsai-Hill* afirma que, conforme Von Mises, a falha do material ocorre quando a energia distorsional é superior ao da energia distorsional de falha no material, conforme pode-se verificar na Equação 102.

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1u}^t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2u}^t}\right)^2 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{(\sigma_{1u}^t)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12u}}\right)^2} = 1 \quad (102)$$

Com diferença em relação aos dois critérios iniciais, que eram independentes, este estabelece uma interação entre as tensões que os materiais estão sendo submetidas. (KAW, 2006)

De acordo com Tsai SW (1968) o critério de *Tsai-Hill* para fratura pode ser considerado como uma adaptação da forma matemática para o escoamento de Von Mises, isto parte do princípio que quando aplicada uma tensão em um elemento do material pode ser decomposta na componente de pressão hidrostática, somada a uma componente para a tensão desviadora.

Para Hill R. (1998) o critério pode ser considerado como uma tentativa para desenvolver uma interação quadrática, que tem por finalidade ajustar melhor os resultados apresentados nos experimentos. Esta teoria utiliza-se da plasticidade anisotrópica de Hill e a aplica para uma possível falha frágil de materiais homogêneos e anisotrópicos. A superfície para a falha deste critério é fornecida pela Equação 103.

$$(G+H)\sigma_{11}^2 + (F+H)\sigma_{22}^2 + (F+G)\sigma_{33}^2 - 2H\sigma_{11}\sigma_{22} - 2G\sigma_{11}\sigma_{33} - 2F\sigma_{22}\sigma_{33} + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{13}^2 + 2N\tau_{12}^2 = 1 \quad (103)$$

Esta descrição completa destes coeficientes F , G , H , L , M e N pode ser encontrada em Hill R. (1998). Para esta descrição é válido ressaltar que no critério

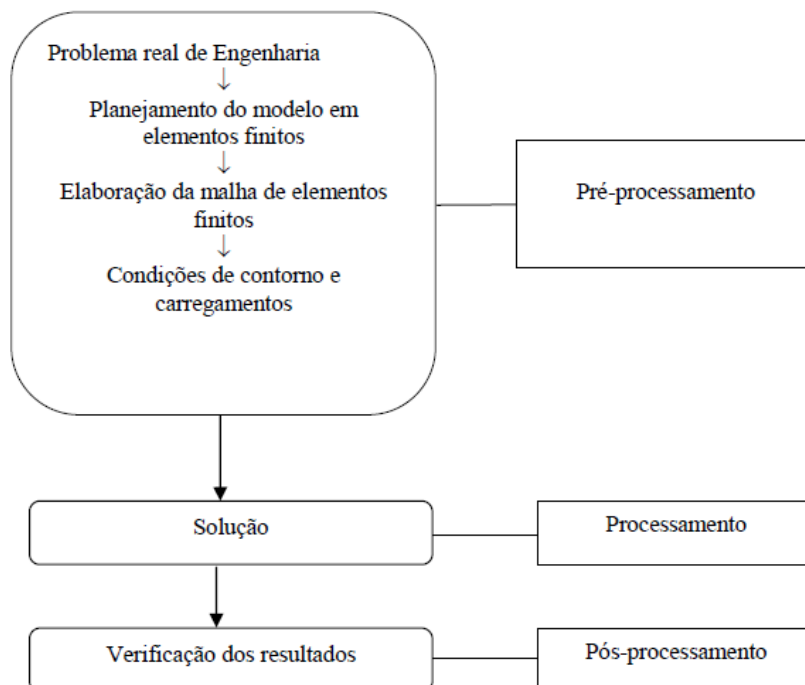
de von Mises, o limiar da falha é o escoamento do material, a medida que no *Tsai-Hill* é a fratura frágil para uma lâmina ortotrópica.

2.21 Soluções numéricas

2.21.1 Método dos elementos finitos

Os sistemas das equações algébricas produzidas através de discretização das estruturas que utilizam condições de equilíbrio e compatibilidade de deslocamentos dos elementos aumenta, a medida que problema torna-se mais complexo. Para resolver de forma numérica um grande número de equações, necessita-se do armazenamento dessas informações e o seu processamento através da notação matricial, com auxílio de um computador. Pode-se verificar que a teoria matricial na qual são utilizados métodos de elementos finitos, não trata-se apenas uma questão organizacional, há também uma seqüência bem definida de etapas que devem ser respeitadas para um bom planejamento das soluções de problemas que necessitam uma maior complexidade. Estas etapas são demonstradas na Figura 32, nas quais envolvem três principais tarefas: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Antes de realizar qualquer cálculo, na primeira etapa, é necessário montar um modelo discretizado da estrutura ao qual será analisada, e nele indicar quais são as condições de contorno presentes, este pode ser nomeado como pré-processamento. Após, na etapa do processamento, ao realizar a segunda tarefa, deverão ser executados os cálculos das matrizes, que são responsáveis pela determinação dos deslocamentos e esforços em seus elementos. Por final, na terceira etapa, são analisados os resultados e é realizada uma verificação da coerência com o problema físico real. (Alves Filho, 2000).

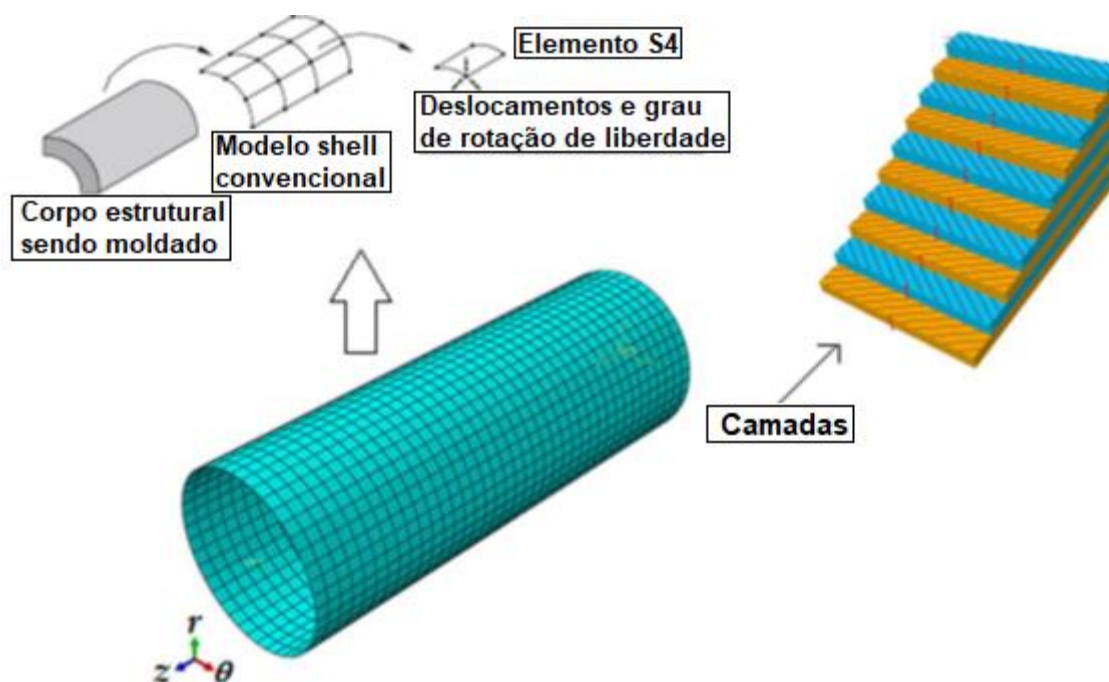
Figura 32 - Seqüência de etapas para aplicação do Método de Elementos Finitos (MEF)



Fonte: Peter Faluhelyi (p.30, 2006).

Conforme Almeida Jr. (2016), é importante ressaltar que o modelo computacional não considera as imperfeições iniciais, pois o modelo de dano simula o aparecimento e falhas progressivas. Assim, as imperfeições materiais aparecem naturalmente em função da falha progressiva e, conseqüentemente, os danos não ocorrem de forma homogênea em toda a superfície do modelo computacional, como na estrutura real. Outra questão é que, independentemente do modelo de dano, a própria estrutura cilíndrica tem uma condição em cada instante na análise numérica realizada. Na Figura 33 pode verificar como são separados os modelos de elementos finitos.

Figura 33 - Detalhe de um modelo de elementos finitos.



Fonte: Almeida Jr. (p. 116, 2016). Adaptado do autor.

2.22 Vasos de pressão cilíndricos

Conforme Vasiliev (2009), caso seja considerada uma casca cilíndrica com parede fina e forças axiais q uniformemente repartidas no contorno na estrutura com raio r pressurizado internamente (p) e, tem-se que as forças (q) representam a interface entre a parte cilíndrica de um vaso de pressão e os seus domos, que fecham o vaso, conforme Figura 33. Esta situação pode ser perfeitamente aplicado aos vasos de pressão cilíndricos com domos também cilíndricos, que definem um cilindro (ou tubo). Ou seja, um tubo cilíndrico pode ser considerado como um vaso de pressão que possui domos estendidos da seção cilíndrica do vaso de pressão. Na Figura 34 pode-se verificar como são dispostas as direções da seção de um vaso cilíndrico pressurizado. É importante também enfatizar que na transição da seção cilíndrica de um vaso para o domo, existe uma descontinuidade nas tensões meridionais. Por exemplo, em um domo esférico, a tensão axial (σ_a) passa de $pr/2t$

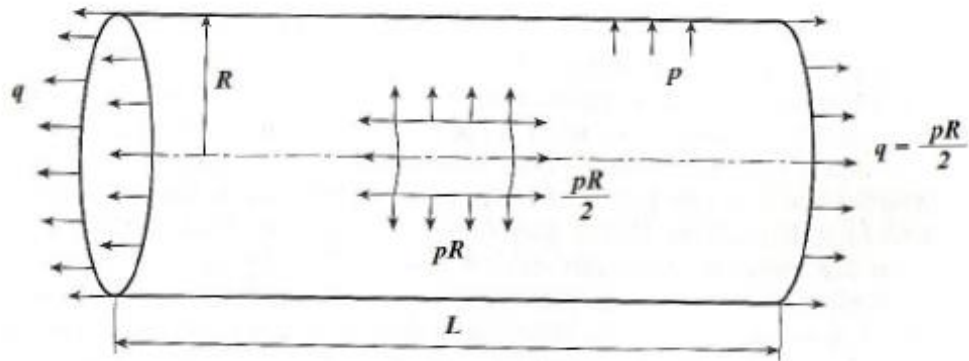
para pr/t conforme Equação 105. Ao aplicar a condição para o equilíbrio na direção axial da estrutura, obtém-se que:

$$\pi r^2 p = 2\pi r q \quad (104)$$

Simplificando,

$$q = \frac{pr}{2} \quad (105)$$

Figura 34 - Seção de um vaso cilíndrico pressurizado internamente.



Fonte: Vasiliev, (p.16, 2009).

As tensões que atuam na parede interna do vaso de pressão podem ser definidas em função de suas tensões axiais (σ_a) e circunferenciais (σ_c) atuando no cilindro, como demonstram as Equação 106 e 107. Nesta situação, $\sigma_c = 2\sigma_a$ ao contrário para o caso de um domo esférico, em que $\sigma_c = \sigma_a$ (MISTRY e LEVY-NETO, 1994).

$$\sigma_c = \frac{pR}{t} \quad (106)$$

e

$$\sigma_a = \frac{pR}{2t} \quad (107)$$

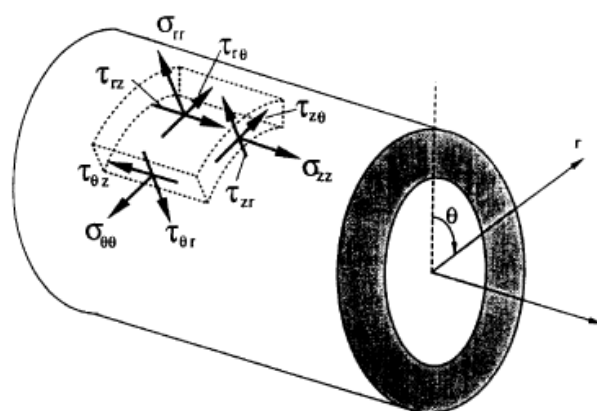
$$t = \frac{\bar{p} R}{\sigma_T} \quad (108)$$

Onde t é a espessura de parede do cilindro. Pode-se considerar \bar{p} como sendo a pressão de explosão e σ_T a resistência à tração do vaso.

2.23 Ensaio hidrostático de pressão interna

Segundo Alves I.G (2006), ensaios hidrostáticos de pressão interna normalmente são realizados nas tubulações submetidas à pressão interna e demais tipos de carregamento, este tem por objetivo simular condições do trabalho de um material e também determinar a sua resistência. Nesse tipo de teste, as bombas tem como finalidade injetar líquido em um tubo que possui vedação, para aumentar a pressão interna e fazer com que o este rompa. Os tubos que são submetidos a vários esforços simultaneamente irão apresentar para cada elemento da parede três tensões normais e outras três cisalhantes, tais como: tensão longitudinal (σ_{zz}), tensão circunferencial ($\sigma_{\theta\theta}$) e tensão radial (σ_{rr}), onde as suas tensões de cisalhamento τ atuam em cada um dos planos ortogonais que são perpendiculares às suas tensões normais. A Figura 35 demonstra um esquema destas tensões que atuam no tubo.

Figura 35 - Representação das tensões atuantes em uma tubulação



Fonte: ALVES, I. G., (p. 25, 2006).

Conforme Albuquerque, R. J. (2005), as tensões cisalhantes responsáveis por atuar em um plano perpendicular ao eixo do tubo são oriundas dos momentos de torção, normalmente como resposta às dilatações térmicas. As demais tensões cisalhantes são originárias de diversos momentos fletores, estas atuam sobre o tubo. A tensão circunferencial é formada por parcelas de resultantes da pressão e também pelo achatamento local do tubo, devido a influência dos diversos momentos fletores atuantes. No caso da tensão radial, esta pode ser causada exclusivamente pela pressão, na qual o seu valor normalmente é baixo em tubos de parede fina, por isso, pode ser desprezada nos cálculos. Já a tensão longitudinal é formada por parcelas das resultantes da pressão, movimentos dos suportes e pontos extremos, momento fletor, momentos fletores das dilatações térmicas, tensões de montagem e cargas axiais.

2.24 Tubos de materiais compósitos e suas aplicações

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras têm encontrado extensas aplicações na indústria de petróleo e gás nas últimas três décadas em áreas como módulos, proteção, equipamentos, tubos coletores e vasos de pressão.

Figura 36 - Instalação de módulos de tubos para indústria de petróleo.



Fonte: Fonte¹².

Avanços muito importantes foram realizados nas áreas de tubos compósitos e manuseio de fluidos. O alto custo para substituir a tubulação de aço em aplicações de reforma e o grande aumento da longevidade nas novas construções estão induzindo cada vez mais a utilização de compósitos que resistem às condições severas experimentadas no ambiente *offshore*¹³. Na indústria *offshore* de petróleo e gás, os compósitos oferecem várias vantagens em potencial, devido o custo de fabricação e montagem de plataformas de petróleo poderem ser significativamente reduzidos, quando os dutos de metais pesados podem ser substituídos por outros mais leves feitos de compósitos.

12

Revista digital <https://compositesuk.co.uk/composite-materials/applications/oil-and-gas>.

13

Offshore: instalações realizadas no mar.

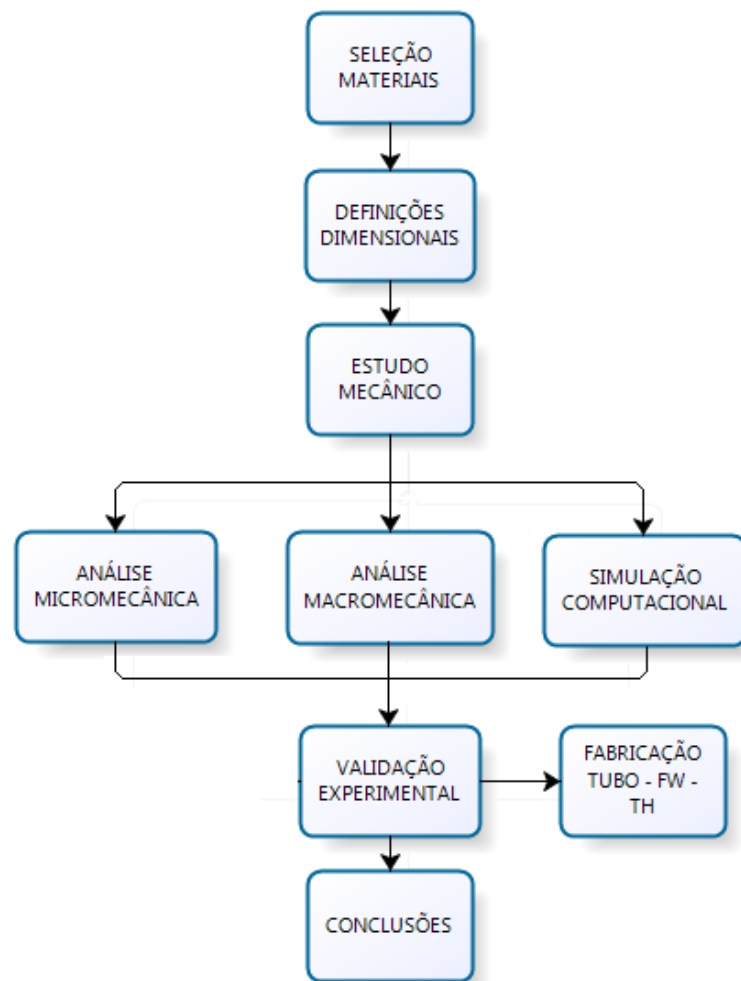
Os tubos compósitos podem ser usados para tubulações de água de incêndio, resfriamento de água do mar, sistemas de drenagem e esgotos. As vantagens de custo dos produtos compósitos são muito maiores quando substituem metais caros resistentes à corrosão, como ligas de cobre-níquel, aço inoxidável duplex / super duplex, titânio, etc., usados em plataformas offshore para várias aplicações. Sua resistência à corrosão ajuda a melhorar a confiabilidade e a segurança, além de reduzir os custos do ciclo de vida.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresentam-se os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do estudo, sendo detalhados aspectos como: materiais, produção dos tubos, equipamentos e métodos.

O desenvolvimento do estudo e fabricação do tubo de material compósito foi realizado no Laboratório de Polímeros (LAPOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e o teste hidrostático foi desenvolvido em parceria com uma empresa da região especializada que possui um tanque pressurizado para imersão em água apropriado para a condição desejada.

Figura 37 - Fluxograma representando a metodologia adotada no trabalho



Fonte: Do autor (2018).

3.1 Materiais

Nesta seção serão apresentados os materiais utilizados na matriz polimérica e reforço dos tubos.

3.1.1 Matriz polimérica

A matriz polimérica utilizada é composta pela mistura de resina epóxi denominada UF3369 TCRT da marca TCRTM RESIN e da matriz denominada T700S da marca TORAYCA, o polímero é indicado para ser utilizado em aplicações que necessitem alto desempenho.

A cura desse polimérico é realizada a quente, na qual é necessário um ciclo de 04 horas a 121° C, conforme informações indicadas pelo fabricante. Na Tabela 10 e 11 pode-se verificar as principais propriedades da matriz e da resina.

Tabela 10 - Propriedades do material da Fibra T700S

Propriedades	Unidades	Valor
Resistência a Tração	(MPa)	2.55
Módulo de Tensão	(GPa)	135
Deformação	%	1.7
Densidade	g/cm ³	1.80
Diâmetro do filament	µm	7
Força de Compressão	(MPa)	1.47
Resistência a Flexão	(MPa)	1.67
Módulo de Flexão	(GPa)	120

Fonte: Fabricante TORAYCA. Adaptado do autor.

Tabela 11 - Propriedades do material da resina epóxi UF3369

Temperatura de cura e tempo de espera	121° C por 4 horas
Densidade	1,18 g/cc
Resistência a Tração	92,4 MPa
Módulo de Elasticidade	3.1 GPa
Alongamento até Ruptura	3,6%
Curva para Tg E" DMA	117°C
Tg após 24-Hr Ebulição da Água	67° C
Absorção em Água	5,0%

Fonte: Fabricante TCR RESIN. Adaptado do autor.

3.1.2 Reforço

Foram utilizadas fibras de carbono/epóxi no formato prepreg, dispostas na forma de rolos, como demonstrada na Figura 38 para reforço dos tubos. As principais propriedades deste material podem ser verificadas na Tabela 12.

Figura 38 - *Towpreg* de carbono/epóxi no formato de *Roving*.



Fonte: Lapol UFRGS (2018). Adaptado do autor.

3.1.3 Desmoldante

Para facilitar a retirada do tubo foi aplicado o agente desmoldante denominado 770-NC-Frekote da marca LOCTITE. Esta aplicação é feita de maneira uniforme sobre a superfície do mandril para que seja possível a retirada da peça após ser realizada a sua cura total.

3.2 Métodos

Nesta seção, será descrita a metodologia dos cálculos de micromecânica, macromecânica, estrutural utilizada na fabricação dos tubos e ensaios mecânicos.

3.2.1 Método analítico

3.2.1.1 Micromecânica

Para estas análises, inicialmente, utilizou-se o *software Autodesk Helius Composite* 2017, para a finalidade de obter as propriedades da fibra e matriz para calcular volume, fração de peso (fração de massa) de fibra e matriz, densidade e fração vazia nos compósitos, com auxílio das Tabelas 12 e 13

Tabela 12- Propriedades típicas da fibra (Sistema de Unidades SI)

Propriedade	Unidades	Carbono
Módulo axial	(GPa)	230
Módulo transversal	(GPa)	22
Coeficiente de Poisson axial		0.30
Coeficiente de Poisson transversal		0.35
Módulo axial cisalhante	(GPa)	33
Resistência à tração axial	(MPa)	2067
Resistência à compressão axial	(MPa)	1999,0
Resistência à tração transversal	(MPa)	77
Resistência à compressão transversal	(MPa)	42
Força de cisalhamento no plano	(MPa)	36
Gravidade específica		1.8

Fonte: KAW (p. 208, 2006). Adaptado do autor.

Tabela 13 - Propriedades típicas da matriz (Sistema de Unidades SI)

Propriedade	Unidades	Epóxi
Módulo axial	(GPa)	3.4
Módulo transversal	(GPa)	3.4
Coeficiente de Poisson axial		0.30
Coeficiente de Poisson transversal		0.3
Módulo axial cisalhante	(GPa)	1.308
Resistência à tração axial	(MPa)	72
Resistência à compressão axial	(MPa)	102
Resistência à tração transversal	(MPa)	72
Resistência à compressão transversal	(MPa)	102
Força de cisalhamento no plano	(MPa)	34
Gravidade específica		1.2

Fonte: KAW (p.208, 2006). Adaptado do autor.

3.2.1.2 Macromecânica

Com relação às análises, utilizou-se o *software Autodesk Heliuss Composite* 2017 para obter as propriedades do laminado. Para isso são inseridos valores das propriedades de cada lâmina, espessura e ângulo de orientação, conforme valores da Tabela 14.

Tabela 14 - Propriedades Típicas de uma Lâmina Unidirecional (Sistema de Unidades SI)

Propriedade	Símbolo	Unidades	Carbono/Epóx i
Fração de volume da Fibra	V_f		0.7
Módulo elástico longitudinal	E_1	(GPa)	181
Módulo de elasticidade transversal	E_2	(GPa)	10.30
Coeficiente de Poisson no plano 1-2	ν_{12}		0.28
Módulo de cisalhamento no plano	G_{12}	(GPa)	7.17
Resistência à tração longitudinal	$\sigma_{1,t}$	(MPa)	1500
Resistência à compressão longitudinal	$\sigma_{1,c}$	(MPa)	1500
Resistência à tração transversal	$\sigma_{2,t}$	(MPa)	40
Resistência à compressão transversal	$\sigma_{2,c}$	(MPa)	246
Força de cisalhamento no plano	τ_{12}	(MPa)	68

Fonte: KAW (p.106, 2006). Adaptado do autor.

3.2.2 Método estrutural

Uma análise estrutural numérica prévia antes de realizar o teste hidrostático foi realizada através do *software* Abaqus 6.14, na qual utiliza os princípios básicos dos métodos de elementos finitos (MEF). Este é um método estimado para cálculos de sistemas contínuos, na qual este contínuo é separado em um número finito de partes (elementos), estes são conectados entre si por pontos discretos, que são denominados os nós. Esta subdivisão de estruturas em elementos é descrita como malha.

Os dados utilizados para a realização da simulação estrutural são demonstrados conforme Tabela 15.

Tabela 15 - Propriedades de material representativo usadas como entrada nos modelos numéricos

	Símbolo	Descrição	Valor
Constantes Elásticas	$E1(GPa)$	Módulo elástico longitudinal	129.3
	$E2=E3(GPa)$	Módulo de elasticidade transversal	9.11
	$\nu12=\nu13$	Coeficiente de Poisson no plano 1-2	0.32
	$\nu23$	Coeficiente de Poisson no plano 2-3	0.35
	$G12=G13(GPa)$	Módulo de cisalhamento no plano	5.44
	$G23(GPa)$	Módulo de cisalhamento transversal no plano 2-3	2.1
Resistências	$\sigma_{1,t}(MPa)$	Resistência à tração longitudinal	1409.9
	$\sigma_{1,c}(MPa)$	Resistência à compressão longitudinal	-740
	$\sigma_{2,t}(MPa)$	Resistência à tração transversal	42.5
	$\sigma_{2,c}(MPa)$	Resistência à compressão transversal	-140.3
	$\tau_{12}(MPa)$	Tensão de cisalhamento no plano	68.9

Fonte: Almeida Jr, (p. 117, 2016). Adaptado do autor.

Para o estudo da simulação de método dos elementos finitos (MEF) não foram levados em consideração as propriedades térmicas de expansão.

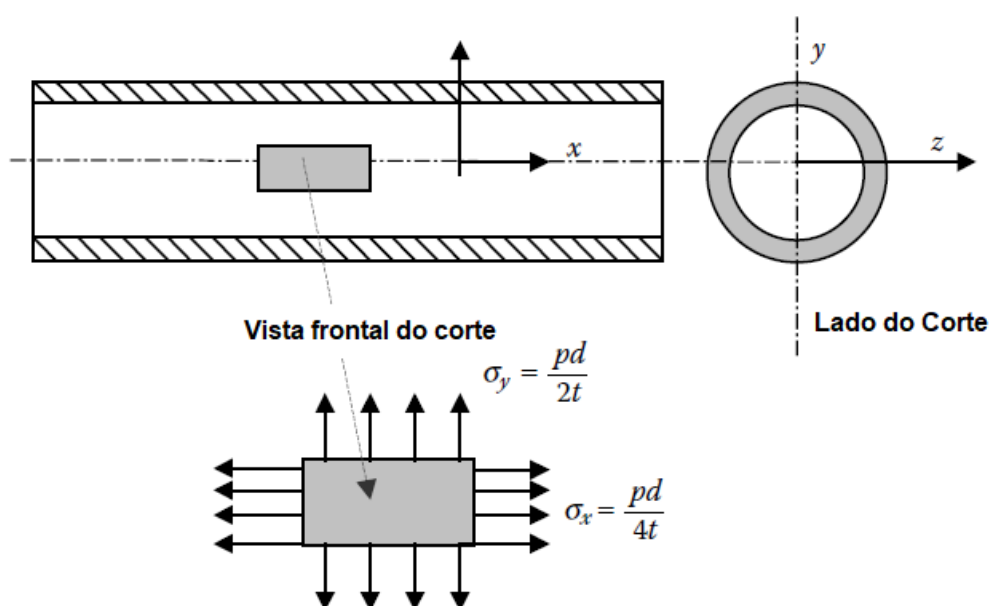
3.2.3 Método de cálculos

Nesta seção serão demonstrados os cálculos básicos da alimentação dos dados para o desenvolvimento do modelo analítico calculado pelo *Software Autodesk Heliuss Composite* 2017.

3.2.3.1 Dados para os cálculos de entrada

Um tubo cilíndrico de 30 cm de comprimento Figura 39 com um diâmetro interno de 2,54 cm é submetido a uma pressão manométrica interna de 12 kgf/cm² e espessura de 0,12 cm de parede.

Figura 39 - Recipiente de pressão compósito de fibra.



Fonte: Kaw (p. 402, 2007). Adaptado do autor.

3.2.3.1.1 Dados de entrada

Para vasos de pressão cilíndricos de paredes finas, tensão circunferencial ou tensão do arco σ_y e a tensão longitudinal ou axial σ_x é dada pelas Equações 109 e 110.

$$\sigma_x = \frac{pr}{2t} \quad (109)$$

$$\sigma_y = \frac{pr}{t} \quad (110)$$

Onde:

p = pressão manométrica interna, kgf/cm².

r = raio do cilindro, cm.

t = espessura do cilindro, cm.

Para este caso, tem-se:

$$p = 12 \text{ kgf/cm}^2$$

$$r = 1,27 \text{ cm}$$

ou seja, se substituir os valores na Equação 109, tem-se a Equação 112.

$$\sigma_x = \frac{(12)1,27}{2t} \quad (111)$$

$$\sigma_x = \frac{7,62}{t} \quad (112)$$

Substituindo-se a espessura na Equação 109 tem-se a tensão em x,

$$\sigma_x = \frac{7,62}{0,12} \quad (113)$$

$$\sigma_x = 63,5 \text{ kgf/cm}^2 \quad (114)$$

Substituindo-se a espessura na Equação 110 tem-se a tensão em y,

$$\sigma_y = \frac{15,24}{0,12} \quad (115)$$

$$\sigma_y = 127,0 \text{ kgf/cm}^2 \quad (116)$$

Para realizar a conversão de kgf/cm² para MPa é necessário utilizar a Equação 117,

$$\sigma_x = 63,5 \text{ kgf/cm}^2 \times 0,098 \quad (117)$$

$$\sigma_x = 6,2227 \text{ MPa} \quad (118)$$

Para realizar a conversão de kgf/cm² para MPa é necessário utilizar a Equação 119,

$$\sigma_y = 127,0 \text{ kgf/cm}^2 \times 0,098 \quad (119)$$

$$\sigma_y = 12,4544 \text{ Mpa} \quad (120)$$

Para realizar o cálculo da área do tubo vazado (S_L) é necessário utilizar a Equação 121, com as seguintes condições:

$R = 1,27 \text{ cm}$ – raio externo

$r = 1,15 \text{ cm}$ – raio interno

$h = 30 \text{ cm}$ – altura do tubo

$$S_L = 2\pi h(R+r) \quad (121)$$

$$S_L = 2\pi 30(1,27+1,15) \quad (122)$$

$$S_L = 456,16 \text{ cm}^2 \quad (123)$$

Para calcular a força axial são necessárias as Equações 124, 125 e 126, 127 e 128 e as condições a seguir:

$$F = P \times A \quad (124)$$

$$A = S_L \quad (125)$$

$$P = 12 \text{ kgf/cm}^2 \quad (126)$$

$$F = 12 \text{ kgf/cm}^2 \times 456,16 \text{ cm}^2 \quad (127)$$

$$F = 5473,92 \text{ kgf} \quad (128)$$

Para converter de kgf para N é necessário utilizar a Equação 129.

$$F = 5473,92 \times 9,81 \quad (129)$$

$$F = 53699,15 \text{ N} \quad (130)$$

Para as forças por unidade de comprimento utiliza-se as Equações 131 e 135.

$$N_x = \sigma_x t \quad (131)$$

$$N_x = \frac{7,62}{t} t \quad (132)$$

$$N_x = 7,62 \text{ kgf/cm} \quad (134)$$

$$N_y = \sigma_y t \quad (135)$$

$$N_y = \frac{15,24}{t} t \quad (136)$$

$$N_x = 15,24 \text{ kgf/cm} \quad (137)$$

3.2.3.1.2 Massa para cada camada

A massa de uma camada de carbono/epóxi é dada pela Equação 138.

$$\frac{m_c}{E_p} = \frac{V_c}{E_p} \frac{\rho_c}{E_p} \quad (138)$$

Onde,

$$\frac{V_c}{E_p} = \text{volume da camada de carbono/epóxi, cm}^3 \quad (139)$$

$$\frac{\rho_c}{E_p} = \text{densidade da camada de carbono/epóxi, kgf/cm}^3 \quad (140)$$

$$\frac{V_c}{E_p} = \pi L d t_p \quad (141)$$

Onde,

L = comprimento do cilindro, cm.

d = diâmetro do cilindro, cm.

t_p = espessura da camada do carbono/epóxi, cm

Sabe-se que L=30 cm, d=2,54 cm, t_p = 0,12 cm, e ao substituir os valores da Equação 142, tem-se:

$$\frac{V_c}{E_p} = \pi(30)(2,54)(0,12) \quad (142)$$

$$\frac{V_c}{E_p} = 28,7267 \text{ cm}^3 \quad (143)$$

3.2.3.1.3 Densidade da lâmina

A densidade da lâmina de carbono/epóxi é dada pela Equação (144)

$$\frac{\rho_c}{Ep} = \rho_c V_f + \rho_{Ep} V_m \quad (144)$$

Conforme a Tabela 15, o volume de fração da fibra considerada, V_f , do carbono/epóxi é 0,7, então,

$$V_f = 0,7 \quad (145)$$

O volume de fração da matriz, V_m , é dada pela Equação (146).

$$V_m = 1 - V_f \quad (146)$$

$$V_m = 1 - 0,7 \quad (147)$$

$$V_m = 0,3 \quad (148)$$

Para a gravidade específica do carbono e do epóxi, deve-se verificar a Tabela 13 e 14, na qual respectivamente, $Sc = 1,8$ e $S_{Ep} = 1,2$ e a densidade da água é 999,9917473 para kg/m³. Usa-se a Equação 149 para descobrir a densidade da lâmina.

$$\frac{\rho_c}{Ep} = (1,8)(999,9917473)(0,7) + (1,2)(999,9917473)(0,3) \quad (149)$$

$$\frac{\rho_c}{Ep} = 1619,98 \text{ kg/m}^3 \quad (150)$$

Portanto, a massa de uma lâmina de carbono / epóxi pode ser calculada substituindo a Equação 151.

$$\frac{m_c}{Ep} = \frac{V_c}{Ep} \frac{\rho_c}{Ep} \quad (151)$$

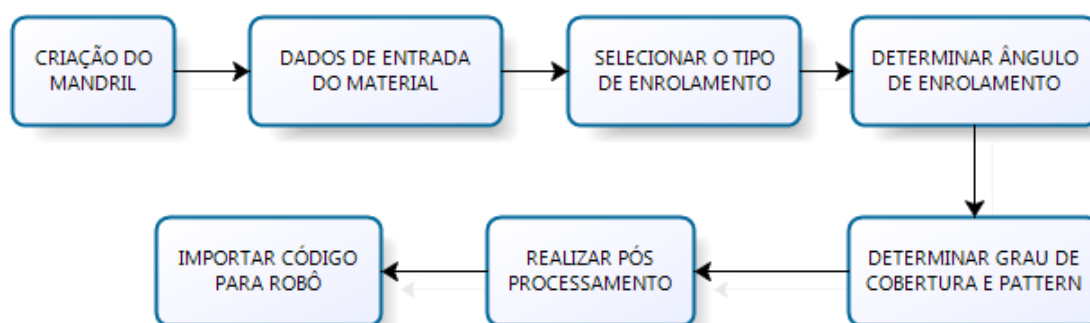
$$\frac{m_c}{Ep} = (2,87267 \times 10^{-5})(1619,98) \quad (152)$$

$$\frac{m_c}{Ep} = 0,0465 \text{ kg} \quad (153)$$

3.2.4 Programação de enrolamento

A programação de enrolamento foi realizada com o auxílio do *software CADWind 2007*. O *CADWind* possui a função idêntica ao de um *software* CAD, que com base na geometria que é construída, utiliza um modelo físico do processo de enrolamento filamentar com a finalidade de executar um programa para a peça, desta forma pode realizar a execução do CAM. Com a integração entre ambas as etapas do processo, torna-se possível diminuir erros de projeto e também agilizar os processos.

Figura 40 - Fluxograma representando a metodologia do desenvolvimento do enrolado no *software* Cadwind

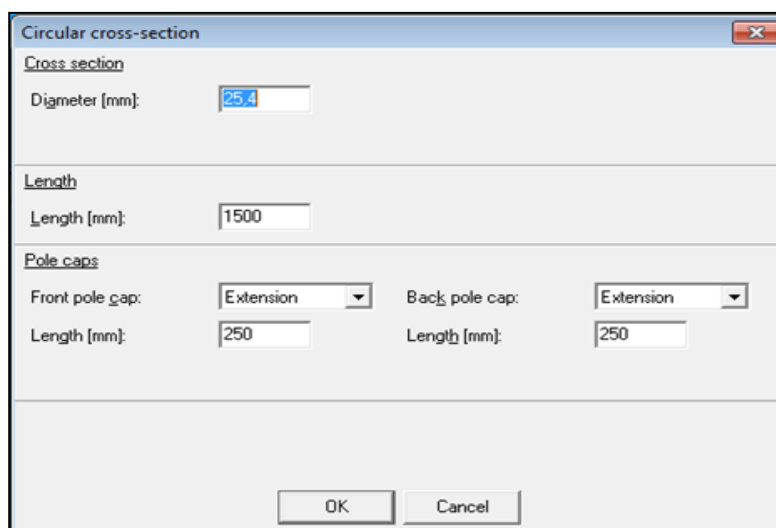


Fonte: Do autor (2018).

Para realizar-se a programação do enrolado, primeiro insere-se o tipo da geometria da peça, após, são inseridas os dados de entrada do mandril como na Figura 41. e os dados de entrada do material, tais como, densidade da fibra e resina conforme Figura 42 .

Depois de inseri-los, deve-se selecionar os dados de entrada do enrolamento, como é apresentado na Figura 41, tais como, padrão de enrolamento, número de camadas, ângulo de enrolamento e também o número de rolos. Para este estudo foram utilizados dois tipos de enrolamento, 45° e 55°, como pode ser visualizado na Figura 41 e 42.

Figura 41 - Dados de entrada do mandril

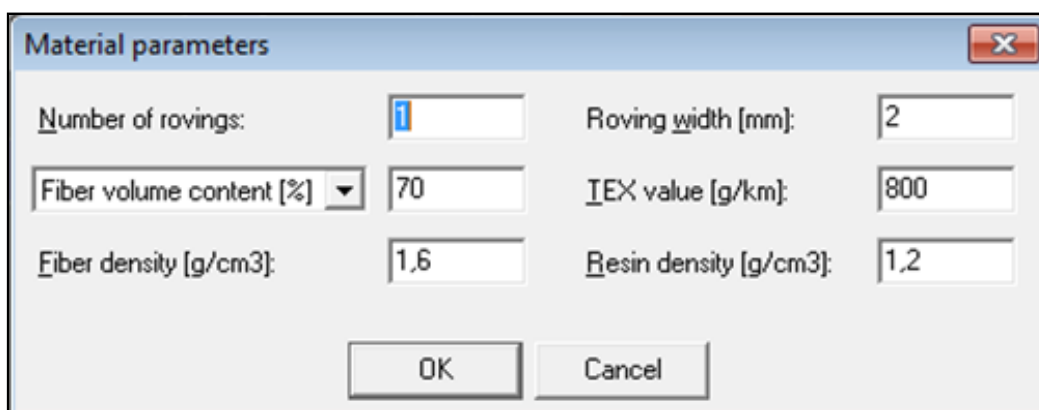


A dialog box titled "Circular cross-section" with a close button (X) in the top right corner. It contains three sections: "Cross section" with a "Diameter [mm]" input field set to 25.4; "Length" with a "Length [mm]" input field set to 1500; and "Pole caps" with two columns. The left column has "Front pole cap:" with a dropdown menu set to "Extension" and a "Length [mm]" input field set to 250. The right column has "Back pole cap:" with a dropdown menu set to "Extension" and a "Length [mm]" input field set to 250. At the bottom are "OK" and "Cancel" buttons.

Circular cross-section	
Cross section	
Diameter [mm]:	25.4
Length	
Length [mm]:	1500
Pole caps	
Front pole cap:	Extension
Length [mm]:	250
Back pole cap:	Extension
Length [mm]:	250
OK Cancel	

Fonte: CADWin. Adaptado do Autor (2018).

Figura 42 - Dados de entrada do material



A dialog box titled "Material parameters" with a close button (X) in the top right corner. It contains six input fields arranged in two columns. The left column has "Number of rovings:" (input 1), "Fiber volume content [%]" (dropdown menu, 70), and "Fiber density [g/cm3]:" (input 1.6). The right column has "Roving width [mm]:" (input 2), "IEX value [g/km]:" (input 800), and "Resin density [g/cm3]:" (input 1.2). At the bottom are "OK" and "Cancel" buttons.

Material parameters	
Number of rovings:	1
Roving width [mm]:	2
Fiber volume content [%]	70
IEX value [g/km]:	800
Fiber density [g/cm3]:	1.6
Resin density [g/cm3]:	1.2
OK Cancel	

Fonte: CADWind. Lapol UFRGS. Adaptado do Autor (2018).

Figura 43 - Dados de entrada do enrolamento

The 'Helical winding parameters' dialog box includes the following fields and options:

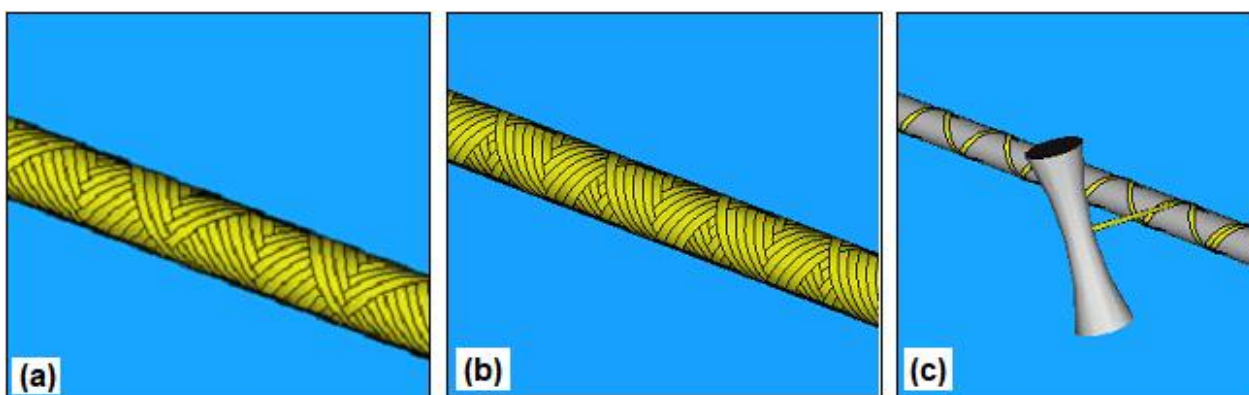
- Starting angle [*]: 45
- Starting frame: 7
- Pattern number: 1/1
- Deg. of covering [%]: 100 (with a dropdown arrow)
- Number of layers: 1
- Dwell front [*]: 0
- Dwell back [*]: 0
- Close winding pattern:
 - ☐ don't change path
 - ☒ change entire path
 - ☐ in turning zones only

Buttons at the bottom: OK, Start winding, Cancel.

Fonte: CADWind. Lapol UFRGS. Adaptado do Autor (2018).

O *software CADWind* pode realizar simulações tais como: simulação de enrolamento Figura 44a, 44b ao longo da peça e também a simulação da variação do ângulo de enrolamento (FIGURA 44c).

Figura 44 - Simulações CAM no *software CADWind* para programação dos enrolamentos filamentar: (a) simulação de enrolamento 45°, (b) simulação de enrolamento 55°, (c) simulação de variação de ângulo de enrolamento

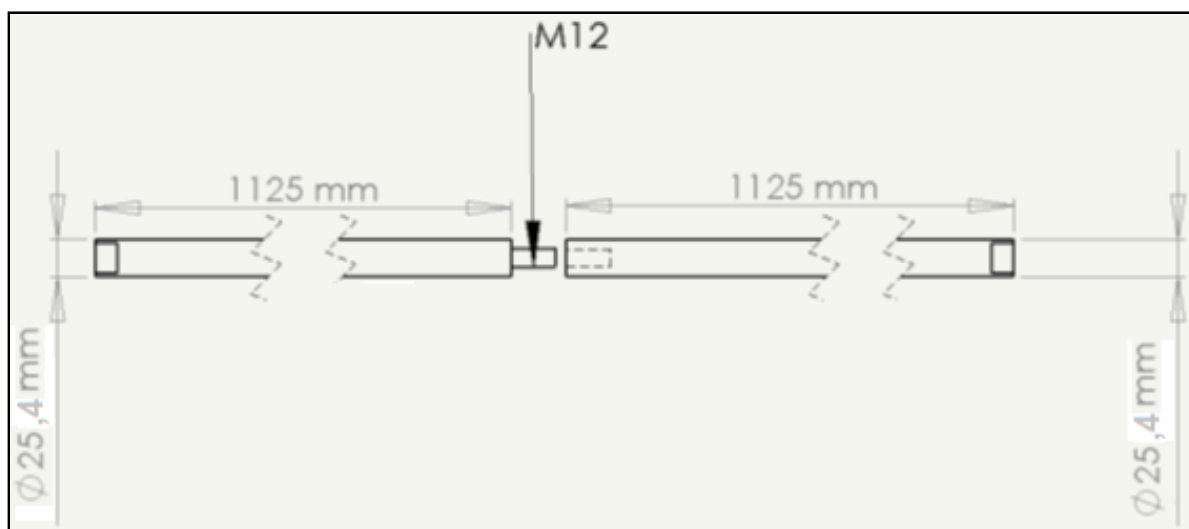


Fonte: CADWind. Lapol UFRGS (2018). Adaptado do Autor.

3.2.5 Produção do mandril

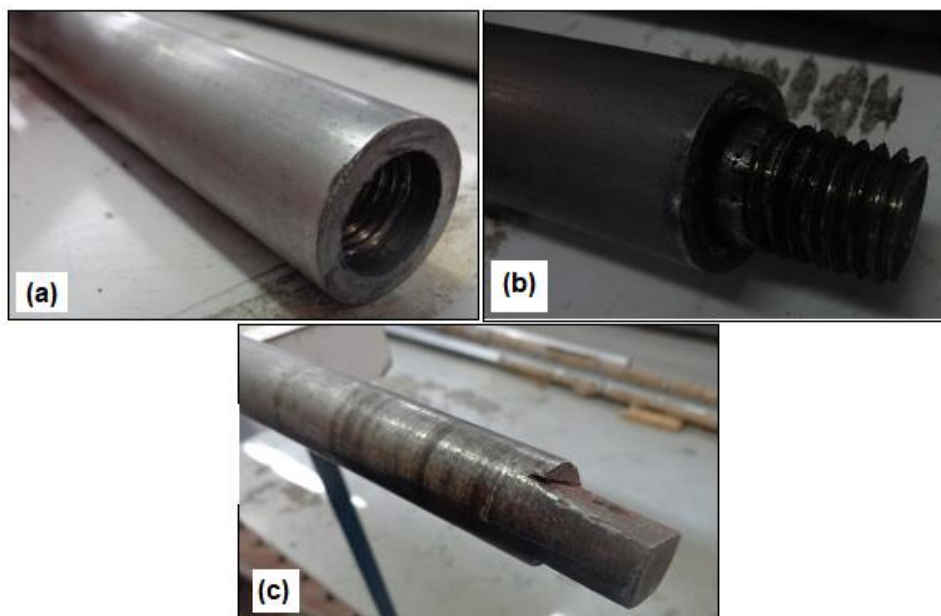
O mandril utilizado foi projetado com a finalidade de facilitar a desmoldagem dos tubos de compósitos e também melhorar a capacidade de produção para agilizar as amostras. Este mandril é confeccionado em aço carbono trefilado, bipartido com roscas M12 na parte interna e externa, com dimensões de 2250 x 25,4 mm e com rebaixo nas extremidades para facilitar a extração do eixo conforme apresentadas nas Figuras 46a, 46b, 46c, para posterior retirada do tubo, conforme apresentado na Figura 45.

Figura 45 - Projeto do mandril utilizado para fabricação dos cilindros.



Fonte: Procurar fonte. Adaptado do autor.

Figura 46 - (a) Detalhe da rosca interna M12, (b) Detalhe da rosca externa M12, (c) detalhe do rebaixo nas extremidades



Fonte: Lapol UFRGS (2018). Adaptado do autor.

Figura 47 - Tubo enrolado sobre o mandril bi-partido



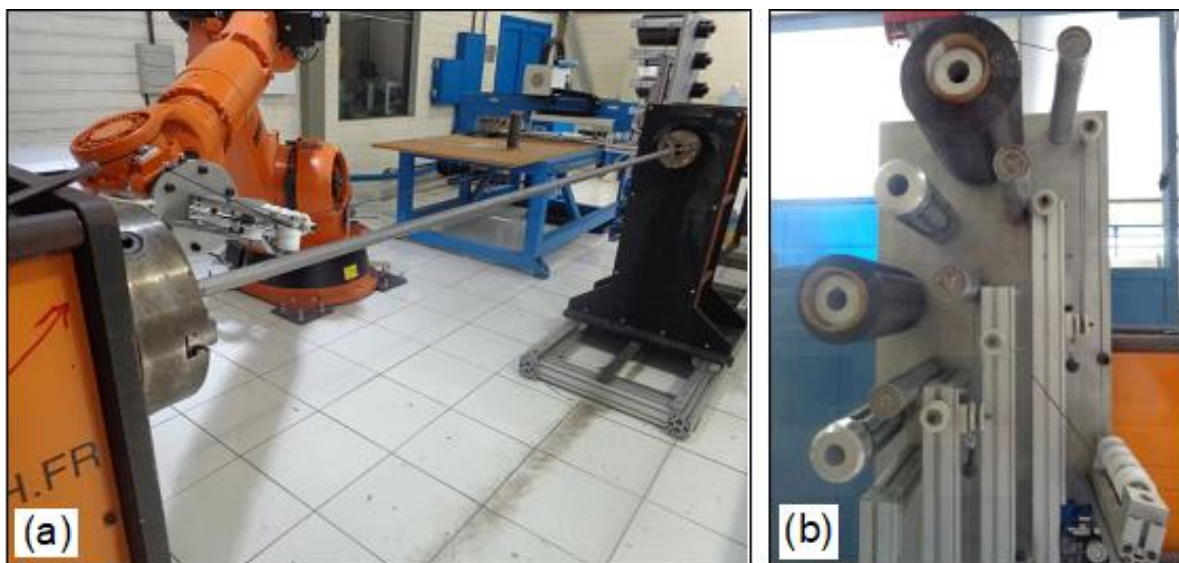
Fonte: Lapol UFRGS (2018). Adaptado do autor.

3.2.6 Descrição do equipamento de enrolamento filamentar

Para a realização da fabricação dos corpos de prova, utilizou-se um equipamento de enrolamento filamentar, da marca MF TECH, modelo KUKA, Figura 48a. Este robô trabalha com até 7 graus de liberdade, tendo como capacidade de

deslocamento transversal entre 1,85 m até 4,8 m e possui quatro alimentadores de fibra de acordo com a Figura 48.

Figura 48 - Equipamento de Enrolamento Filamentar MF Tech (a) alimentadores da fibra (b)



Fonte: Lapol UFRGS (2018). Adaptado do Autor.

3.2.6 Processo de cura e corte

Para o processo de cura do compósito foi utilizado uma estufa horizontal com convecção forçada conforme Figura 48. O tubo compósito foi levado ao forno por 40 minutos até estabilizar em 120°, na qual permaneceu durante 4 horas. Após foi utilizado um equipamento de corte TR 231 da marca Clipper com disco diamantado conforme Figura 49 para realizar o corte das amostras.

Figura 49 - Estufa para cura



Fonte: Lapol UFRGS (2018). Adaptado do Autor.

Figura 50 - Equipamento de corte TR 231 da marca Clipper com disco diamantado.



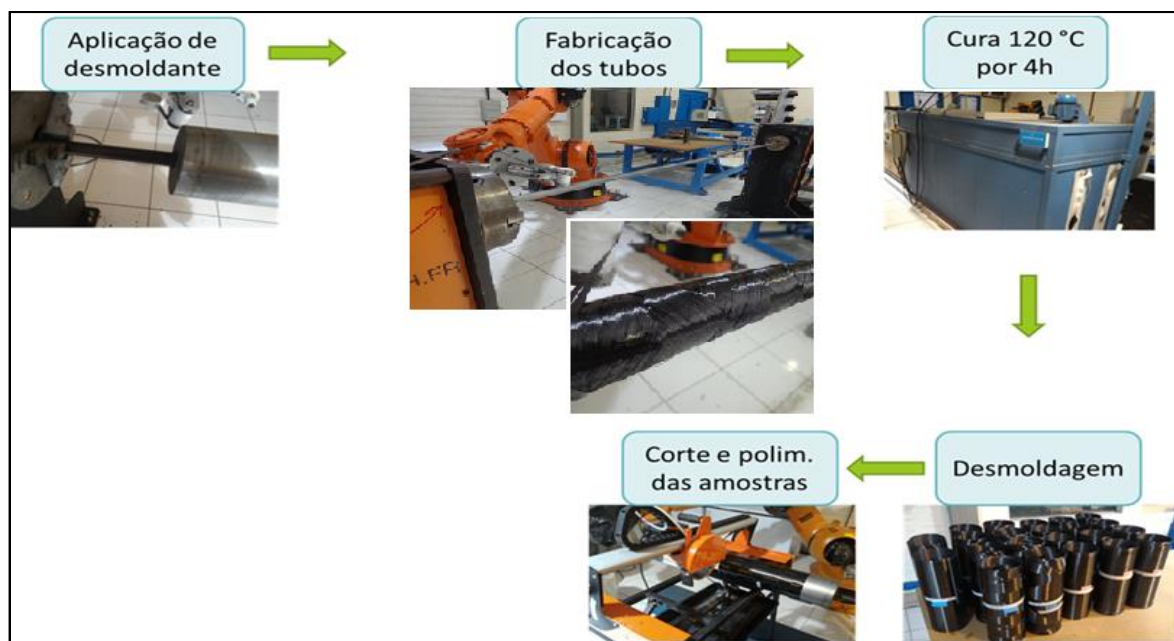
Fonte: Lapol UFRGS (2018). Adaptado do Autor.

3.2.7 Fabricação dos tubos

Os tubos compósitos foram fabricados no Laboratório de Polímeros (Lapol) da UFRGS. Foram produzidos cinco tubos para cada configuração conforme Tabela 17, com diâmetro interno de 1" (25,4 mm) e comprimento de 0,3 m, todos estes possuem duas camadas.

A produção dos tubos por Enrolamento Filamentar e as suas caracterizações realizadas são demonstradas no passo-a-passo da Figura 51.

Figura 51 - Fluxograma das etapas básicas para obtenção do amostral



Fonte: Do Autor (2018).

Após concluir a programação, insere-se o código no robô para iniciar o ciclo de fabricação dos tubos de compósitos. O mandril é preparado para receber o enrolamento, na qual é aplicado o agente desmoldante antes da fabricação de cada tubo, logo após realiza-se o enrolamento através do robô KUKA e em seguida o mandril é retirado da castanha, na qual o sistema é levado à estufa horizontal para a cura. Este tubo é submetido a temperatura de 120 °C durante 4 h, conforme as indicações do fabricante.

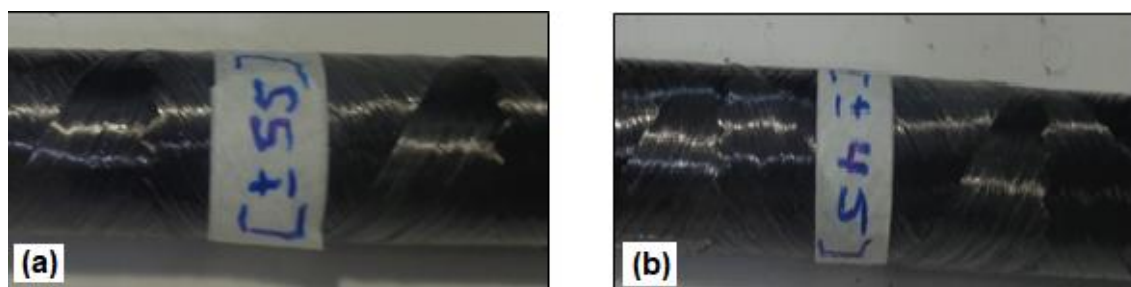
A fim de facilitar a identificação, os tubos receberam a seguinte descrição de acordo com sua configuração, como mostra a Tabela 16.

Tabela 16 - Descrição dos tubos fabricados por enrolamento filamentar.

	Configuração
Tubo 1	$[\pm 55^\circ]$
Tubo 2	$[\pm 45^\circ]$

Fonte: Do autor (2018).

Figura 52 - Tubos produzidos por enrolamento filamentar, (a) tubo 1, (b) tubo 2.



Fonte: Do autor (2018).

3.2.8 Ensaios hidrostáticos de pressão interna

Os ensaios hidrostáticos nos tubos foram realizados em parceria com uma empresa da região, sendo utilizado um dispositivo conforme Figura 53. Primeiramente foram testados os tubos em um protótipo desenvolvido para suportar baixas pressões, até 30 kgf/cm², conforme Figura 52a e 52b, com a finalidade de verificar a sua estanqueidade e ter um parâmetro inicial para realizar os testes.

Figura 53 - (a),(b) Protótipo para testes hidrostáticos em tubos de baixa pressão



Fonte: Do autor (2018).

O sistema de vedação Figura 53 é composto por uma flange de base, cabeças de vedação, bucha bi-partida, a qual fica sobre a cabeça de vedação, uma bucha interna para aumentar a área de contato com o tubo e barras roçadas. Desta forma, ao apertar os parafusos das buchas bi-partidas o tubo é pressionado, que por sua vez comprime o O-Ring. Desta forma, o O-Ring se deforma e faz a vedação nas paredes do tubo. Pode-se ressaltar também que o ponto de entrada da água acontece somente em uma cabeça de vedação, a outra extremidade permanece fechada.

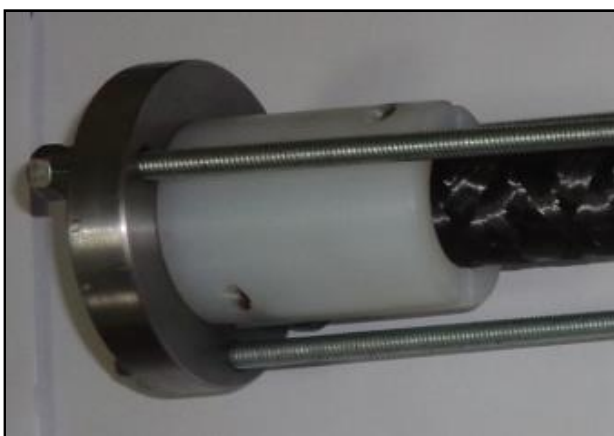
Figura 54 - Dispositivo para ensaios hidrostáticos



Fonte: Do autor (2018).

Com o objetivo de simular um carregamento unicamente circunferencial nos testes hidrostáticos, foram utilizadas três barras roscadas em reforço às cabeças de vedação Figura 54, com esta forma construtiva impede-se que as extremidades exerçam tensões trativas no tubo no momento que é pressurizado.

Figura 55 - Detalhe da cabeça de vedação.



Fonte: Do autor (2018).

Após estes testes iniciais realizados no protótipo para baixa pressão, utilizou-se um tanque de alta pressão da marca STIMG com capacidade de pressurização para ultra-alta pressões até 250 kgf/cm² com bomba hidropneumática (FIGURA 53).

Em seguida, foram montados o dispositivo com a tampa conforme Figura 55, posteriormente inseridos no tanque e realizada a sua vedação. A pressão injetada

pela bomba foi regulada de forma manual para os ensaios, com a finalidade de manter a menor taxa de carregamento.

Figura 56 - (a) Tanque pressurizado para imersão em água fechado, (b) tanque de imersão aberto, (c) dispositivo fixo na tampa para imersão em água



Fonte: Do autor (2018).

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1 Micromecânica

Os dados utilizados para o cálculo das propriedades do laminado foram obtidos a partir de uma simulação realizada no laboratório do Lapol (UFRGS). O material do referido perfil estrutural é de fibra de carbono e resina epóxi. Para este perfil de tubo foi considerado uma fração volumétrica de fibras de 70%. Na tabela 18, seguem as propriedades consideradas para cálculo das propriedades da lâmina através da micromecânica de compósitos.

Tabela 17 - Dados do compósito para simulação estrutural

Compósito T700S-Carbono-Epóxi	
Descrição	Valor
Tipo de Compósito	Unidirecional
Fibra Vf (%)	70,0E+00
Espessura (m)	1,20E-02
E11 (Pa)	1,29E+11
E22 (Pa)	9,11E+09
E33 (Pa)	9,11E+09
G12 (Pa)	5,44E+09
G13 (Pa)	5,44E+09
G23 (Pa)	2,09E+09
NU12	3,20E-01
NU13	3,20E-01

Continua

Termina

NU23	3,50E+01
CTE1 (m/m/C)	0,00E+00
CTE2 (m/m/C)	0,00E+00
CTE3 (m/m/C)	0,00E+00
CME1 (m/m/%m)	0,00E+00
CME2 (m/m/%m)	0,00E+00
CME3 (m/m/%m)	0,00E+00
+S1 (Pa)	1,41E+09
+S2 (Pa)	4,29E+07
-S1 (Pa)	-7,40E+08
-S2 (Pa)	-1,40E+08
S12 (Pa)	6,89E+07
+e1 (m/m)	7,63E-06
+e2 (m/m)	1,55E-04
-e1 (m/m)	-4,01E-06
-e2 (m/m)	-8,12E-05
e12 (m/m)	1,27E-03
K1 (W/m/K)	0,00E+00
K2 (W/m/K)	0,00E+00
K3 (W/m/K)	0,00E+00
Densidade (g/m3)	1,80E+06

Fonte: Do autor (2018).

4.2 Análise macromecânica do laminado – tubo circunferencial

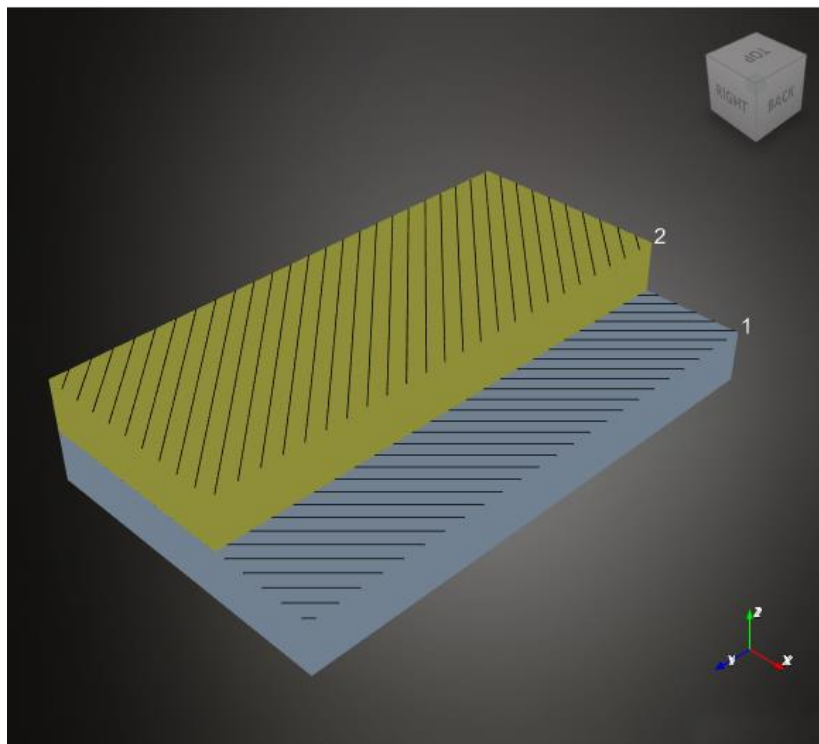
A análise macromecânica do laminado foi realizada com o *software Autodesk Heliuss Composite 2017*, pode-se verificar os seus resultados conforme Tabelas 18 e 19 a disposição do laminado de acordo com a Figura 57, como também os valores encontrados das matrizes nas Tabelas 20, 21 e 22.

Tabela 18 - Disposição do laminado

Laminado: T700S-Carbono-Epóxi			
Camada	Material	Espessura (m)	Ângulo
1	T700S-Carbono-Epóxi	0,0006	45
2	T700S-Carbono-Epóxi	0,0006	-45

Fonte: Do autor (2018).

Figura 57 - Disposição das camadas 1 e 2 do laminado



Fonte: Do autor (2018).

Tabela 19 - Propriedades do laminado 2D e 3D

Propriedades do Laminado 2D		Propriedades do Laminado 3D	
Título	Valor	Título	Valor
Ex (Pa)	1,62E+10	Ex (Pa)	1,89E+10
Ey (Pa)	1,62E+10	Ey (Pa)	1,89E+10
Gxy (Pa)	1,45E+10	Ez (Pa)	-8,31E+06
NUxy	4,86E-01	Gxy (Pa)	3,24E+10
NUyx	4,86E-01	Gxz (Pa)	3,77E+09
Exb (Pa)	1,62E+10	Gyz (Pa)	3,77E+09
Eyb (Pa)	1,62E+10	NUxy	7,39E-01
Gxyb (Pa)	1,45E+10	NUyx	7,39E-01
NUxyb	-4,86E-01	NUxz	6,10E+00
NUyxb	-4,86E-01	NUzx	-2,68E-03
CTEx (m/m/C)	0,00E+00	NUyz	6,10E+00
CTEy (m/m/C)	0,00E+00	NUzy	-2,68E-03
CTExy (m/m/C)	0,00E+00	CTEx (m/m/C)	0,00E+00
CTExk (1/m/C)	0,00E+00	CTEy (m/m/C)	0,00E+00

Continua

Termina

CTE _{yk} (1/m/C)	0,00E+00	CTE _z (m/m/C)	0,00E+00
CTE _{xyk} (1/m/C)	0,00E+00	CTE _{yz} (m/m/C)	0,00E+00
CME _x (m/m/%m)	0,00E+00	CTE _{zx} (m/m/C)	0,00E+00
CME _y (m/m/%m)	0,00E+00	CTE _{xy} (m/m/C)	0,00E+00
CME _{xy} (m/m/%m)	0,00E+00	CME _x (m/m/%m)	0,00E+00
CME _{xk} (1/m/C)	0,00E+00	CME _y (m/m/%m)	0,00E+00
CME _{yk} (1/m/C)	0,00E+00	CME _z (m/m/%m)	0,00E+00
CME _{yk} (1/m/C)	0,00E+00	CME _{yz} (m/m/%m)	0,00E+00
Densidade (g/m ³)	1,80E+06	CME _{zx} (m/m/%m)	0,00E+00
Espessura (m)	1,20E-03	CME _{xy} (m/m/%m)	0,00E+00
		K _x (W/m/K)	0,00E+00
		K _y (W/m/K)	0,00E+00
		K _z (W/m/K)	0,00E+00
		K _{xy} (W/m/K)	0,00E+00
		Densidade (g/m ³)	1,80E+06
		Espessura (m)	1,20E-03

Fonte: Do autor. (2018).

Tabela 20 - Valores da matriz Q-Barra nas camadas do laminado

Matriz Q-Barra					
Q-Barra para Camada:	1	Ângulo: 45°	Q-Barra para Camada:	2	Ângulo: -45°
Material:	T700S-Epoxi-Carbono		Material:	T700S-Epoxi-Carbono	
4,18E+10	3,09E+10	3,03E+10	4,18E+10	3,09E+10	-3,03E+10
3,09E+10	4,18E+10	3,03E+10	3,09E+10	4,18E+10	-3,03E+10
3,03E+10	3,03E+10	3,34E+10	-3,03E+10	-3,03E+10	3,34E+10

Fonte: Do autor (2018).

Tabela 21 - Valores da matriz ABD nas camadas do laminado

Matriz ABD		
[A]Matriz		
5,01E+07	3,71E+07	0,00E+00
3,71E+07	5,01E+07	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	4,01E+07
[B]Matriz		
0,00E+00	0,00E+00	-1,09E+04
0,00E+00	0,00E+00	-1,09E+04
-1,09E+04	-1,09E+04	0,00E+00
[D]Matriz		
6,01E+00	4,45E+00	0,00E+00
4,45E+00	6,01E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	4,81E+00

Fonte: Do autor (2018).

Tabela 22 - Valores da matriz ABD inversa nas camadas do laminado

Matriz ABD Inversa		
[A]Inversa		
5,15E-08	-2,51E-08	0,00E+00
-2,51E-08	5,15E-08	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	5,76E-08
[B]Inversa		
0,00E+00	0,00E+00	6,00E-05
0,00E+00	0,00E+00	6,00E-05
6,00E-05	6,00E-05	0,00E+00
[D]Inversa		
4,29E-01	-2,09E-01	0,00E+00
-2,09E-01	4,29E-01	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	4,80E-01

Fonte: Do autor (2018).

Os valores obtidos das matrizes Q-Bar, ABD e ABD Inversa são utilizados nos cálculos dos esforços conforme apresentado na revisão bibliográfica nos itens 2.18.4, em função do estado triaxial de tensões em materiais não isotrópicos.

4.3 Resultados da análise de falha potencial na lâmina

A análise de falha potencial na lâmina foi realizada conforme os critérios de Máxima Tensão e *Tsai-Hill*, utilizando o software *Autodesk Helius Composite* 2017.

Tabela 23 - Critério de falha em potencial da lâmina

		Máxima Tensão	Tsai-Hill
Topo	Índice Falha	1,42394E-01	2,27037E-02
	Fator Segurança	7,02277E+00	6,63669E+00
Meio	Índice Falha	1,13065E-01	1,48855E-02
	Fator Segurança	8,84448E+00	8,19631E+00
Inferior	Índice Falha	1,42394E-01	2,27037E-02
	Fator Segurança	7,02277E+00	6,63669E+00

Fonte: Do autor (2018).

Critérios analisados

a) Índice Falha:

> 1 – Falha ocorre

< 1 – Falha não ocorre

b) Fator Segurança

> 1 – Falha não ocorre

< 1 – Falha ocorre

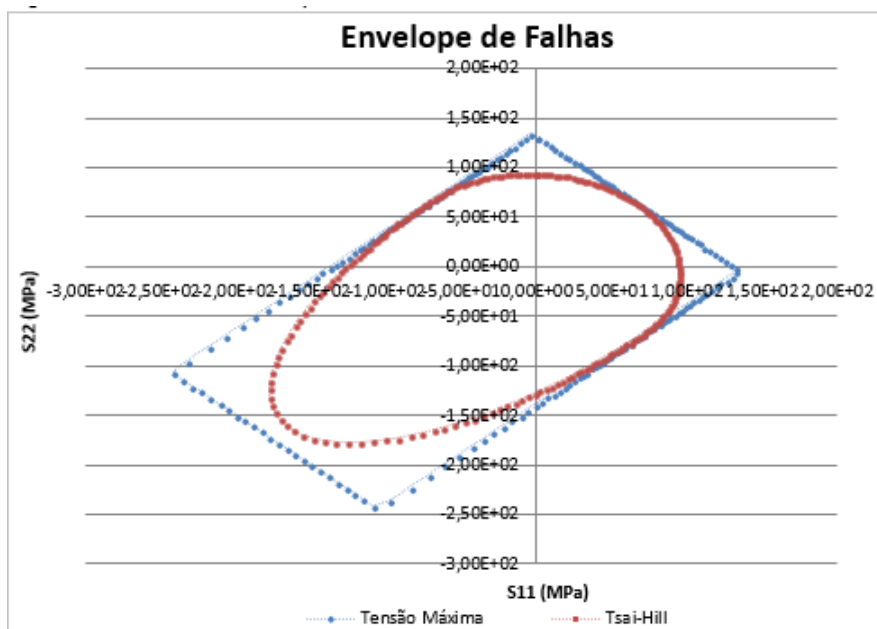
Pelos dados analisados e demonstrados na Tabela 23, pode-se verificar que as cargas especificadas não excederam as cargas necessárias para atingir a falha da primeira camada, ou seja, os índices de falhas encontrados nos dois critérios não são maiores que 1.0, logo não existe indicativo de falha potencial, isto caracteriza que a lâmina está dimensionada com segurança para os níveis de cargas previstas.

Em relação ao fator de segurança para a primeira camada a falhar conforme demonstrada na Tabela 24, pode-se verificar não ocorreu falha, pois os valores encontrados foram todos maiores que 1.0, ou seja, a lâmina pode suportar a carga adicional.

4.4 Resultados da análise do envelope de falhas

Para determinar se um laminado falhou completamente e verificar de forma concisa todas as combinações possíveis das duas cargas no plano selecionado que causam falha no laminado construiu-se também o envelope de falha S11 versus S22 pelos 2 critérios analisados, conforme mostrado na Figura 58, bem como as tensões máximas nas direções descritas.

Figura 58 - Gráfico do envelope de falhas dos dois critérios



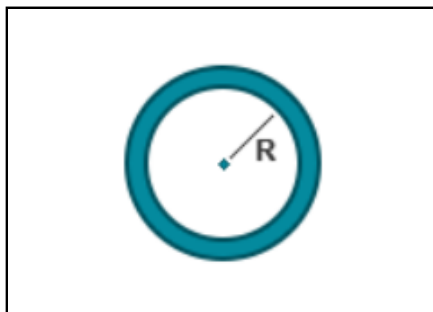
Fonte: Do autor (2018).

Com base no gráfico da Figura 58, pode-se verificar que não ocorreu falha, nenhuma tensão encontrada na análise está fora da região das tensões calculadas na direção X ou na direção Y, portanto, as cargas máximas S11 e S22 (tração/compressão) não foram ultrapassadas.

4.5 Resultados da análise estrutural do tubo

A análise estrutural, as propriedades do tubo e cálculo das cargas resultantes conforme o dimensionamento realizado pelo *software Helius Composite 2017* são demonstradas nas Tabelas 25, 26 e 27. A geometria do tubo pode ser visualizada na (Figura 59).

Figura 59 - Geometria do tubo



Fonte: Do autor (2018).

Tabela 24 - Propriedades da seção conforme *Helius Composite* 2017

Propriedades da Seção	Valor
Tipo de seção: Círculo	
Raio(m)	1,27000E-02
Ex(Pa)	1,61723E+10
Espessura(m)	1,20000E-03
Ix(m ⁴)	8,88728E-09
ExIx(N-m ²)	1,43727E+02
Iy(m ⁴)	8,88728E-09
ExIy(N-m ²)	1,43727E+02
Cmin (m)	-1,39000E-02
Cmax (m)	1,39000E-02
Gxy(Pa)	1,44717E+10
K(m ⁴)	1,77746E-08
GxyJ(N-m ²)	2,57229E+02
Raio de Giro(m)	9,41409E-03
Área(m ²)	1,00280E-04
Peso/comprimento(g/m)	1,80503E+02

Fonte: Do Autor (2018).

Para a análise do tubo com as extremidades fechadas para paredes finas, utilizou-se uma força axial de 53669,15 N e pressão de 1176798 Pa para critérios de

Tensão Máxima e *Tsai-Hill*, cujos resultados encontrados são demonstrados nas Tabela 25 e 26.

Tabela 25 - Critérios de tensão máxima - deformação e tensão na localização das camadas

Critério – Tensão Máxima - Deformação					
Camada#-Loc.	Raio (m)	Var. Raio (m)	Axial (m/m)	Radial (m/m)	Cisalhante(m/m)
1-Inferior	0.0127	-0.000267654	0.0277621	-0.0210751	-1.90286e-013
1-Meio	0.013	-0.000268308	0.0277621	-0.0206391	-1.88587e-013
1-Topo	0.0133	-0.000268701	0.0277621	-0.0202031	-1.86889e-013
2-Inferior	0.0133	-0.000268701	0.0277621	-0.0202031	1.86889e-013
2-Meio	0.0136	-0.000268831	0.0277621	-0.019767	1.85189e-013
2-Topo	0.0139	-0.000268701	0.0277621	-0.019331	1.8349e-013
Critério – Tensão Máxima - Tensão					
Camada#-Loc.	Axial (Pa)	Radial (Pa)	Cisalhante (Pa)		
1-Inferior	5.08561e+008	-2.27884e+007	2.02388e+008		
1-Meio	5.22027e+008	-4.57859e+006	2.15585e+008		
1-Topo	5.35493e+008	1.36313e+007	2.28782e+008		
2-Inferior	5.35493e+008	1.36313e+007	-2.28782e+008		
2-Meio	5.48958e+008	3.18411e+007	-2.41979e+008		
2-Topo	5.62424e+008	5.0051e+007	-2.55176e+008		

Fonte: Do autor (2018).

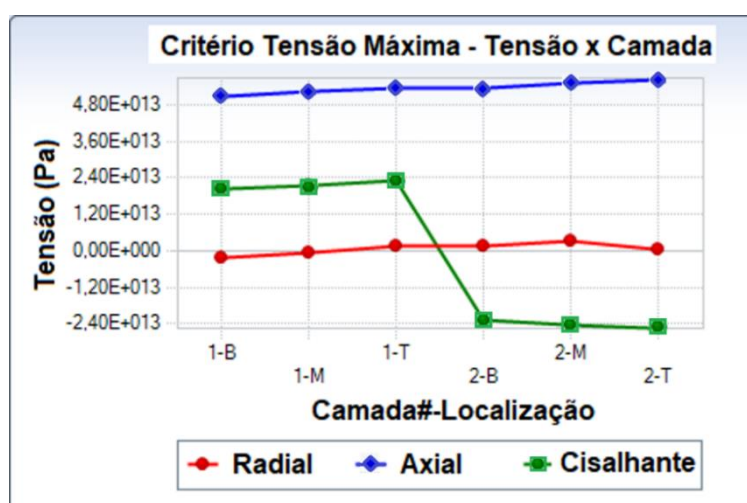
Tabela 26 - Critérios de *Tsai-Hill* – deformação e tensão na localização das camadas

Critério – Tensão Tsai-Hill - Deformação					
Camada#-Loc.	Raio (m)	Var. Raio (m)	Axial (m/m)	Radial (m/m)	Cisalhante(m/m)
1-Inferior	0.0127	-0.000267654	0.0277621	-0.0210751	-1.90286e-013
1-Meio	0.013	-0.000268308	0.0277621	-0.0206391	-1.88587e-013
1-Topo	0.0133	-0.000268701	0.0277621	-0.0202031	-1.86889e-013
2-Inferior	0.0133	-0.000268701	0.0277621	-0.0202031	1.86889e-013
2-Meio	0.0136	-0.000268831	0.0277621	-0.019767	1.85189e-013
2-Topo	0.0139	-0.000268701	0.0277621	-0.019331	1.8349e-013

Critério – Tensão Tsai-Hill - Tensão			
Camada#-Loc.	Axial (Pa)	Radial (Pa)	Cisalhante (Pa)
1-Inferior	5.08561e+008	-2.27884e+007	2.02388e+008
1-Meio	5.22027e+008	-4.57859e+006	2.15585e+008
1-Topo	5.35493e+008	1.36313e+007	2.28782e+008
2-Inferior	5.35493e+008	1.36313e+007	-2.28782e+008
2-Meio	5.48958e+008	3.18411e+007	-2.41979e+008
2-Topo	5.62424e+008	5.0051e+007	-2.55176e+008

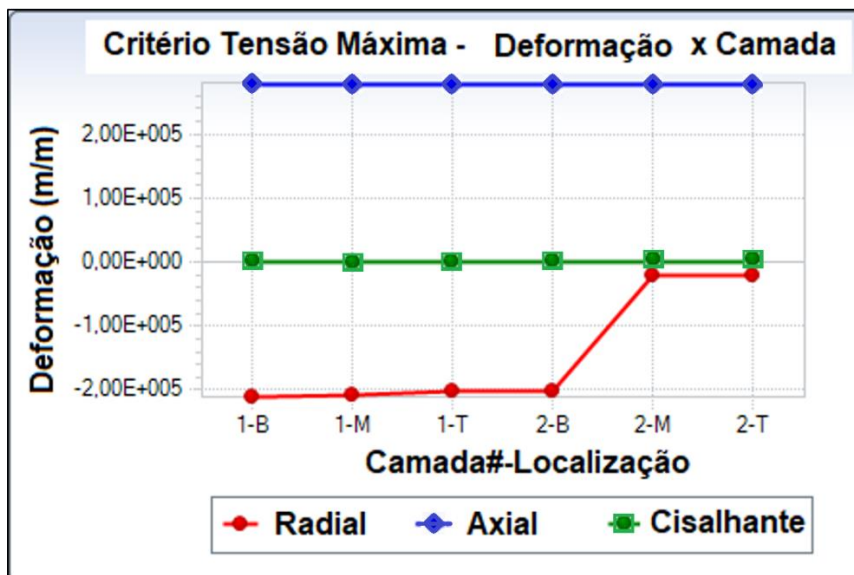
Fonte: Do autor (2018).

Figura 60 - Gráfico do critério tensão máxima – tensão x camada



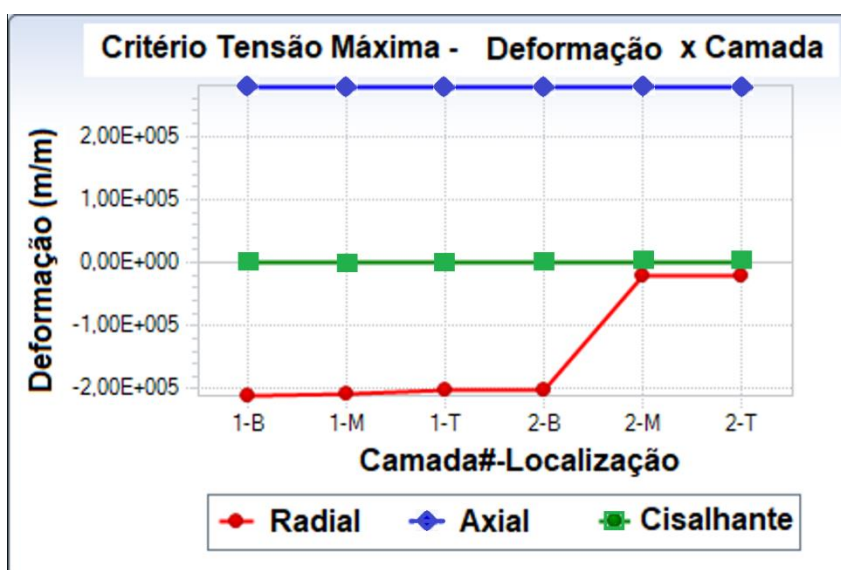
Fonte: Do autor (2018).

Figura 61 - Gráfico do critério tensão máxima – deformação x camada



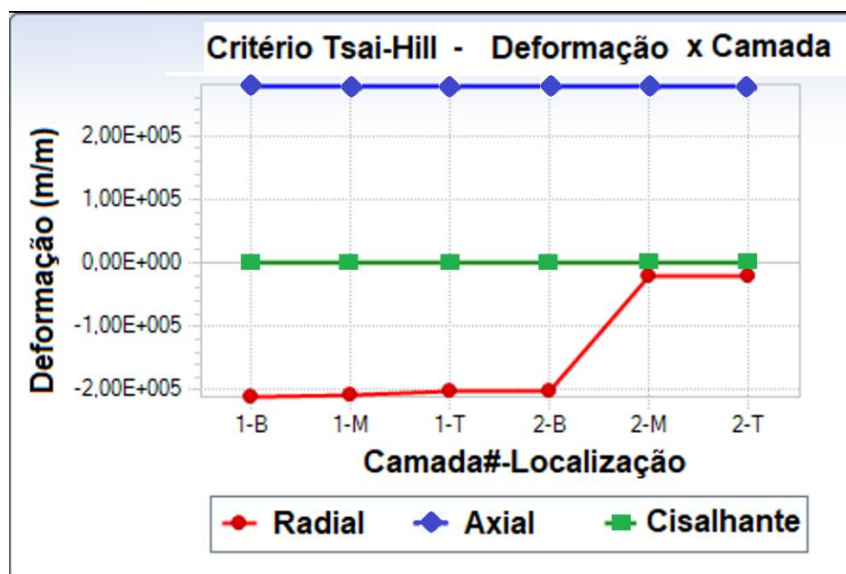
Fonte: Do autor (2018).

Figura 62 - Gráfico do critério *Tsai-Hill* – tensão x camada



Fonte: Do autor (2018).

Figura 63 - Gráfico do critério *Tsai-Hill* – deformação x camada



Fonte: Do autor (2018).

Com base nos gráficos das Figuras 60 e 62 para os critérios de Tensão Máxima e *Tsai-Hill* para Tensão x Camada, pode-se verificar que ocorre uma inversão nas camadas 1 e 2 em relação aos valores das tenões cisalhantes na troca da parte superior da camada 1 para a inferior da camada 2, enquanto que as tensões radiais e axial não variam expressivamente, mantendo-se uniformes.

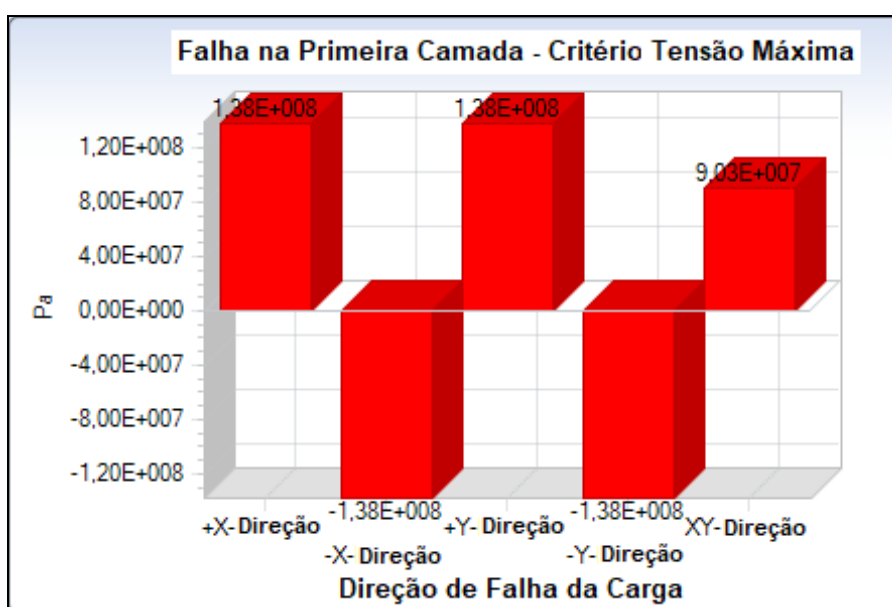
Em relação as Figuras 61 e 63 para os critérios de Tensão Máxima e *Tsai-Hill* para Deformação x Camada, pode-se verificar que somente os valores de deformação alteram-se na direção radial, na primeira camada mantem-se constantes os valores, porém a partir da parte inferior da camada 2 ocorre uma pequena variação até estabilizar-se na parte superior da camada 2.

Comparando-se as análises dos critérios de *Tsai-Hill* e Tensão Máxima pode-se verificar que os gráficos ficaram iguais para Tensão x Camada e também para Deformação x Camada, isto ocorre porque neste estudo as camadas são simétricas.

4.6 Falha na primeira camada

Para estimar qual camada será a primeira a falhar utilizou-se o *software Helius Composite 2017* e aplicou-se um conjunto de cargas nos planos do laminado considerando os critérios de Tensão Máxima e *Tsai-Hill*. Estes valores podem ser verificados no gráfico da Figura 64.

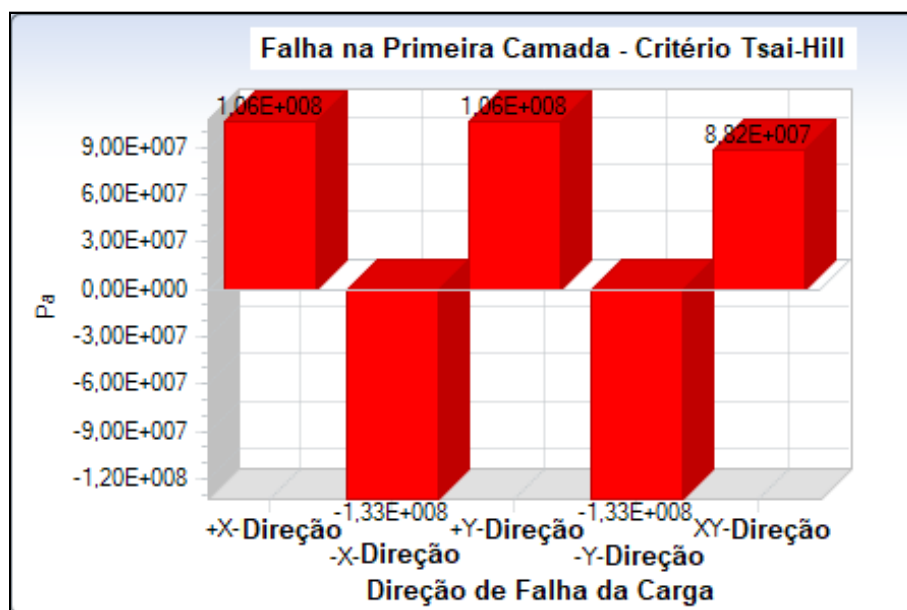
Figura 64 - Falha na primeira camada – critério tensão máxima



Fonte: Do autor (2018).

Conforme o gráfico da Figura 64, pode-se afirmar que para este critério as tensões máximas atingem o valor de $1,38\text{E}+008$ Pa e $-1,38\text{E}+008$ Pa nas direções +X, -X e +Y, -Y, na qual a falha ocorre por cisalhamento na direção XY com o valor de $9,03\text{E}+007$ Pa.

Figura 65 - Falha na primeira camada – critério *Tsai-Hill*



Fonte: Do autor (2018).

De acordo com o gráfico da Figura 65, pode-se afirmar que para este critério as tensões máximas atingem o valor de $1,06\text{E}+008$ Pa na direção +X, $-1,33\text{E}+008$ Pa na direção -X, $1,06\text{E}+008$ Pa na direção +Y, $-1,33\text{E}+008$ Pa na direção -Y, na qual a falha ocorre por cisalhamento na direção XY com o valor de $8,82\text{E}007$ Pa. Se compararmos os resultados das tensões máximas, pode-se verificar que os valores são os mesmos na direção +X e +Y, bem como nas direções -X e -Y.

4.7 Indicativo de Pressão Máxima Suportada

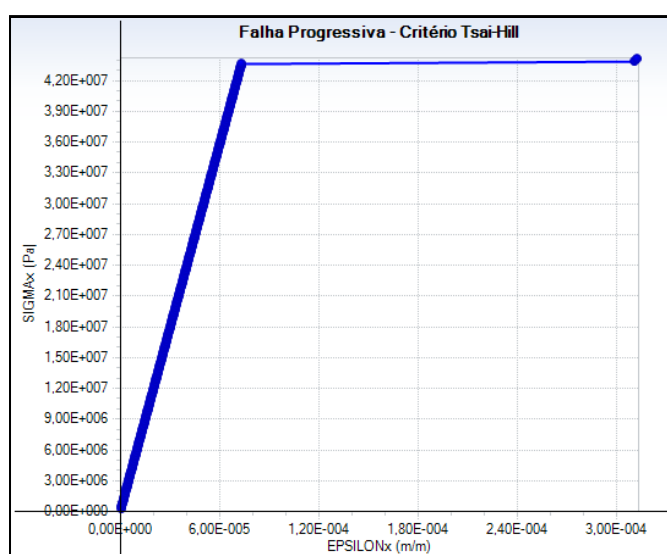
Para estimar a camada que irá falhar primeiro, foi realizado uma simulação no *software Helius Composite 2017* de indicativo de pressão máxima suportada para os critérios de Tensão Máxima e *Tsai-Hill*, a qual foram aplicadas cargas nos planos nas direções X e Y, estes valores encontrados podem ser verificados nas Tabelas 28 e 29.

Tabela 27 - Falha progressiva – Critério *Tsai-Hill*

SIGMAx (Pa)	SIGMAy (Pa)	SIGMAxy (Pa)	EPSILONx (m/m)	EPSILONy (m/m)	EPSILONxy (m/m)	F _{lmax}	FOS _{min}	Falha Camada
4,03332E+07	8,06664E+07	0,00000E+00	6,78098E-05	3,77491E-03	0,00000E+00	9,52980E-01	1,02437E+00	
4,05536E+07	8,11072E+07	0,00000E+00	6,81803E-05	3,79553E-03	0,00000E+00	9,63424E-01	1,01881E+00	
4,07740E+07	8,15480E+07	0,00000E+00	6,85509E-05	3,81616E-03	0,00000E+00	9,73924E-01	1,01330E+00	
4,09944E+07	8,19888E+07	0,00000E+00	6,89214E-05	3,83679E-03	0,00000E+00	9,84482E-01	1,00785E+00	
4,12148E+07	8,24296E+07	0,00000E+00	6,92920E-05	3,85742E-03	0,00000E+00	9,95096E-01	1,00246E+00	
4,14352E+07	8,28704E+07	-3,39696E-05	2,93830E-04	1,68444E-03	2,04811E-03	1,00577E+00	9,97129E-01	2
4,16556E+07	8,33112E+07	-3,40363E-05	2,95393E-04	1,69340E-03	2,05900E-03	6,35313E-02	3,96740E+00	

Fonte: Do autor (2018).

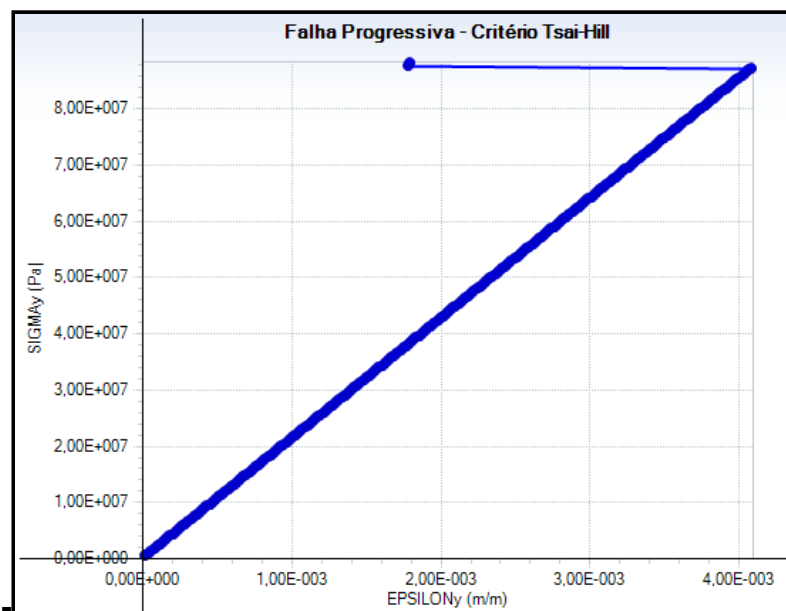
Com base nos valores encontrados na Tabela 27, pode-se afirmar que a falha no critério *Tsai-Hill* ocorre com uma tensão axial na direção X de 4,35610E+07 Pa e com uma tensão transversal Y de 8,71220E+07 Pa, sendo que estas falhas ocorrem na camada 2 na parte superior.

Figura 66 - Gráfico falha progressiva – critério *Tsai-Hill* na direção X

Fonte: Do autor (2018).

Conforme o gráfico de falha progressiva para o Critério de *Tsai-Hill* na direção X demonstrado na Figura 66, pode-se verificar que a falha no conjunto de cargas aplicadas no laminado ocorre de forma abrupta no valor de 4,35610E+07 Pa, ou seja, a camada particular falha e a sua rigidez é drasticamente reduzida para simular a consequência de sua falha.

Figura 67 - Gráfico falha progressiva – critério *Tsai-Hill* na direção Y



Fonte: Do autor (2018).

Conforme o gráfico de falha progressiva para o Critério de *Tsai-Hill* na direção Y demonstrado na Figura 67, pode-se verificar que a falha no conjunto de cargas aplicadas no laminado ocorre de forma abrupta, o mesmo caso do critério anterior, no valor de $8,71220 \times 10^7$ (Pa), ou seja, a camada particular falha e a sua rigidez é drasticamente reduzida para simular a consequência de sua falha.

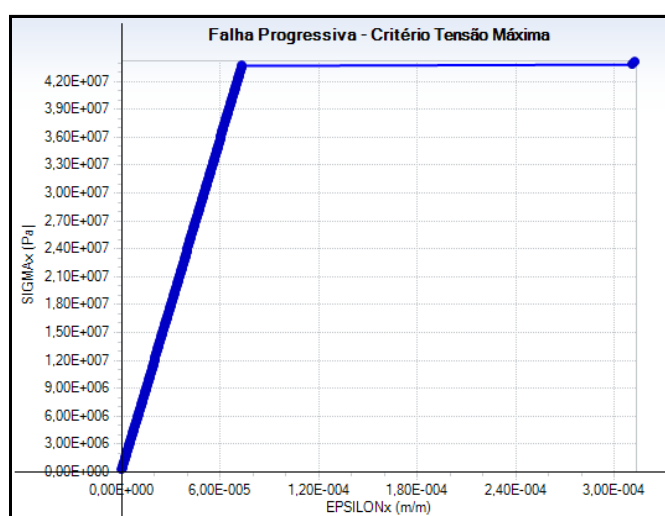
Tabela 28 - Falha progressiva – critério tensão máxima

SIGMAx (Pa)	SIGMAy (Pa)	SIGMAxy (Pa)	EPSILONx (m/m)	EPSILONy (m/m)	EPSILONxy (m/m)	F _{max}	FOS _{min}	Falha Camada
4,07740E+07	8,15480E+07	0,00000E+00	6,85509E-05	3,81616E-03	0,00000E+00	9,32587E-01	1,07229E+00	
4,09944E+07	8,19888E+07	0,00000E+00	6,89214E-05	3,83679E-03	0,00000E+00	9,37628E-01	1,06652E+00	
4,12148E+07	8,24296E+07	0,00000E+00	6,92920E-05	3,85742E-03	0,00000E+00	9,42669E-01	1,06082E+00	
4,14352E+07	8,28704E+07	0,00000E+00	6,96625E-05	3,87804E-03	0,00000E+00	9,47710E-01	1,05518E+00	
4,16556E+07	8,33112E+07	0,00000E+00	7,00330E-05	3,89867E-03	0,00000E+00	9,52751E-01	1,04959E+00	
4,18760E+07	8,37520E+07	0,00000E+00	7,04036E-05	3,91930E-03	0,00000E+00	9,57792E-01	1,04407E+00	
4,20964E+07	8,41928E+07	0,00000E+00	7,07741E-05	3,93993E-03	0,00000E+00	9,62833E-01	1,03860E+00	
4,23168E+07	8,46336E+07	0,00000E+00	7,11447E-05	3,96056E-03	0,00000E+00	9,67874E-01	1,03319E+00	
4,25372E+07	8,50744E+07	0,00000E+00	7,15152E-05	3,98118E-03	0,00000E+00	9,72915E-01	1,02784E+00	
4,27576E+07	8,55152E+07	0,00000E+00	7,18858E-05	4,00181E-03	0,00000E+00	9,77956E-01	1,02254E+00	
4,29780E+07	8,59560E+07	0,00000E+00	7,22563E-05	4,02244E-03	0,00000E+00	9,82997E-01	1,01730E+00	
4,31984E+07	8,63968E+07	0,00000E+00	7,26269E-05	4,04307E-03	0,00000E+00	9,88038E-01	1,01211E+00	
4,34188E+07	8,68376E+07	0,00000E+00	7,29974E-05	4,06370E-03	0,00000E+00	9,93079E-01	1,00697E+00	
4,36392E+07	8,72784E+07	0,00000E+00	7,33680E-05	4,08432E-03	0,00000E+00	9,98120E-01	1,00188E+00	
4,38596E+07	8,77192E+07	-3,59645E-05	3,11023E-04	1,78300E-03	2,16794E-03	1,00316E+00	9,96849E-01	2
4,40800E+07	8,81600E+07	-3,60281E-05	3,12585E-04	1,79196E-03	2,17884E-03	1,97762E-01	5,05659E+00	

Fonte: Do autor (2018).

Com base nos valores encontrados na Tabela 28, pode-se afirmar que a falha no critério de Tensão Máxima ocorre com uma tensão axial na direção X de 4,38596E+07 Pa e com uma tensão transversal Y de 8,77192E+07 Pa, sendo que estas falhas ocorrem na camada 2 na parte superior.

Figura 68 - Gráfico falha progressiva – critério tensão máxima na direção X

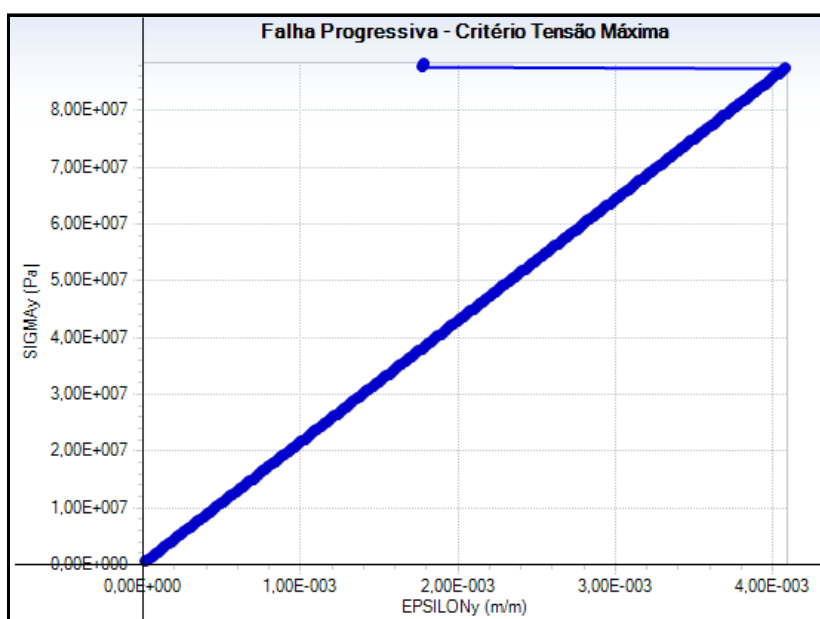


Fonte: Do autor (2018).

Conforme o gráfico de falha progressiva para o Critério de Tensão Máxima na

direção X demonstrado na Figura 68, pode-se verificar que a falha no conjunto de cargas aplicadas no laminado ocorre de forma abrupta no valor de $4,38596\text{E}+07$ Pa, ou seja, a camada particular falha e a sua rigidez é drasticamente reduzida para simular a consequência de sua falha.

Figura 69 - Gráfico falha progressiva – critério tensão máxima na direção Y



Fonte: Do autor (2018).

Conforme o gráfico de falha progressiva para o Critério de Tensão Máxima na direção Y demonstrado na Figura 69, pode-se verificar que a falha no conjunto de cargas aplicadas no laminado ocorre de forma abrupta no valor de $8,77192\text{E}+07$ Pa, ou seja, a camada particular falha e a sua rigidez é drasticamente reduzida para simular a consequência de sua falha.

Com a finalidade de obter-se o valor da pressão máxima nos cálculos das forças/tensões para simular a falha progressiva utilizou-se 85 kgf/cm^2 .

4.8 Análise da simulação estrutural

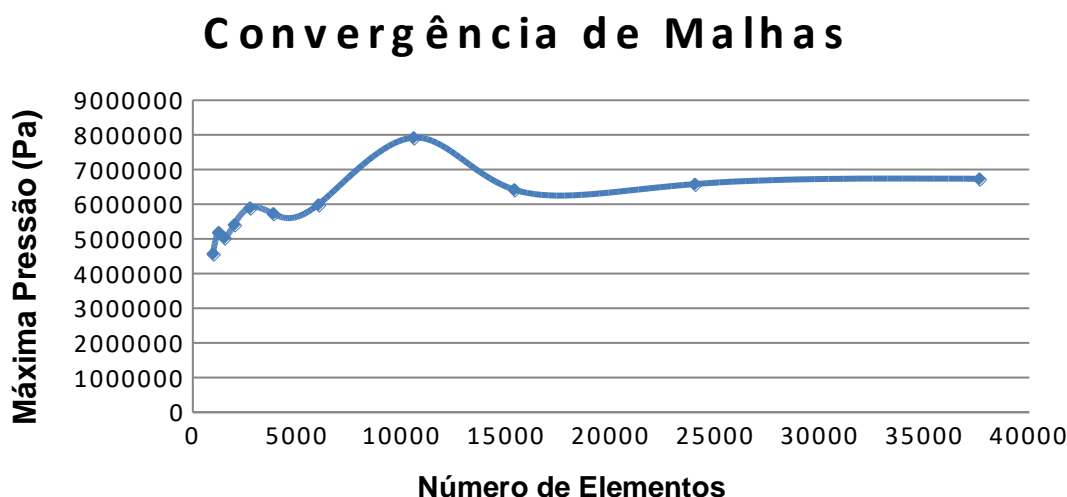
A análise estrutural do tubo compósito proposto no estudo foi realizado com o uso do *software* Abaqus CAE 6.14 SIMULIA 2014. Inicialmente foi desenvolvido o tubo com uma malha de tamanho de elemento 5.0, com 960 elementos, após realizou-se as posteriores convergências para verificar qual seria a melhor condição a ser utilizada na simulação. Os valores encontrados são demonstrados na Tabela 29, e a convergência pode ser verificada na FIGURA 70.

Tabela 29 - Convergência de malhas para máxima pressão

	Pattern Desconsiderado	
Tamanho do Elemento	Número de Elementos	Máxima Pressão (Pa)
5.0	960	4,571E+06
4.5	1224	5,187E+06
4.0	1500	5,032E+06
3.5	1978	5,412E+06
3.0	2727	5,899E+06
2.5	3840	5,732E+06
2.0	6000	5,988E+06
1.5	10547	7,920E+06
1.25	15360	6,422E+06
1.0	24000	6,580E+06
0.8	37600	6,732E+06

Fonte: Do autor (2018).

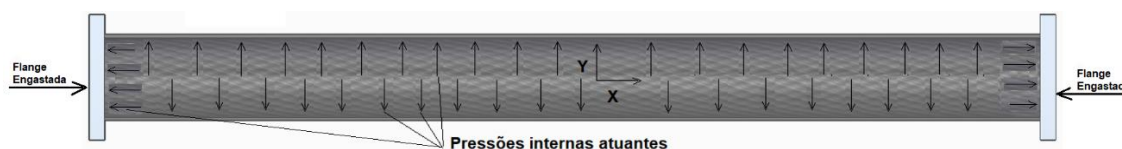
Figura 70 - Gráfico de convergência de malhas - máxima pressão x número de elementos



Fonte: Do autor (2018).

Analisando o gráfico da Figura 70, pode-se inferir que a malha começa a convergir após o tamanho do elemento adquirir um valor de 1.0 e uma Máxima Pressão de 6,58E+06 Pa, no qual ocorre uma variação de apenas de 2%, assim, conforme for aumentando o refino da malha não irá alterar significativamente os resultados, não há mais a necessidade de continuar com a convergência.

Figura 71 - Condições de contorno e pressões internas.

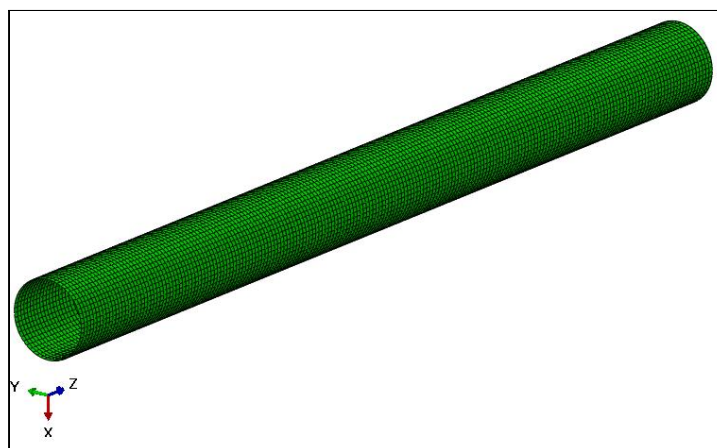


Fonte: Do autor (2018).

Para realizar os testes elaborou-se um desenho do tubo conforme Figura 71, com a malha de tamanho do elemento 1.0 em condições normais. As propriedades utilizadas para realizar a simulação já estão descritas na seção 3.2.2 na Tabela 15.

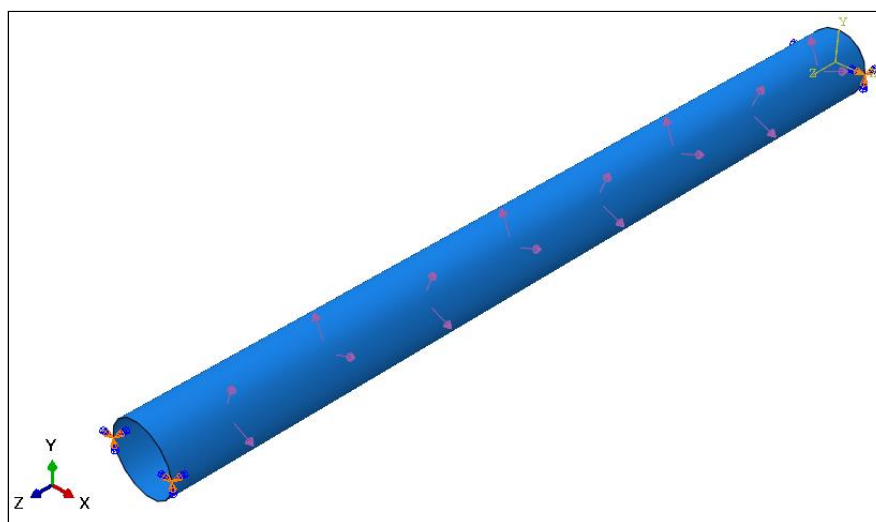
Após foram aplicadas as condições de contorno e as pressões internas nas paredes conforme demonstrado na FIGURA 72.

Figura 72 - Tubo modelado para simulação no software.



Fonte: Do autor (2018).

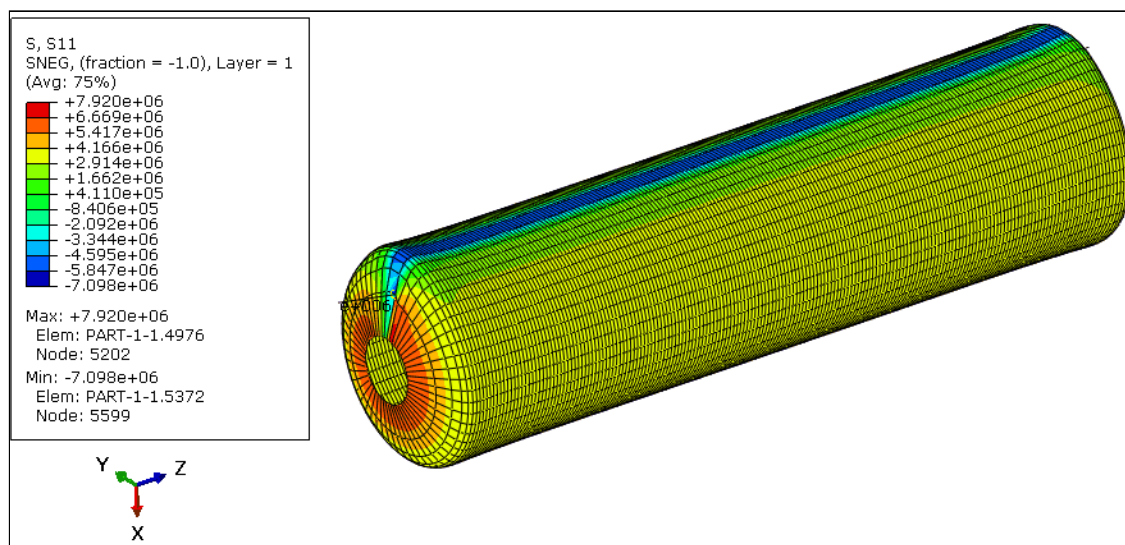
Figura 73 - Tubo com condições de contorno e indicações de pressões internas



Fonte: Do autor (2018).

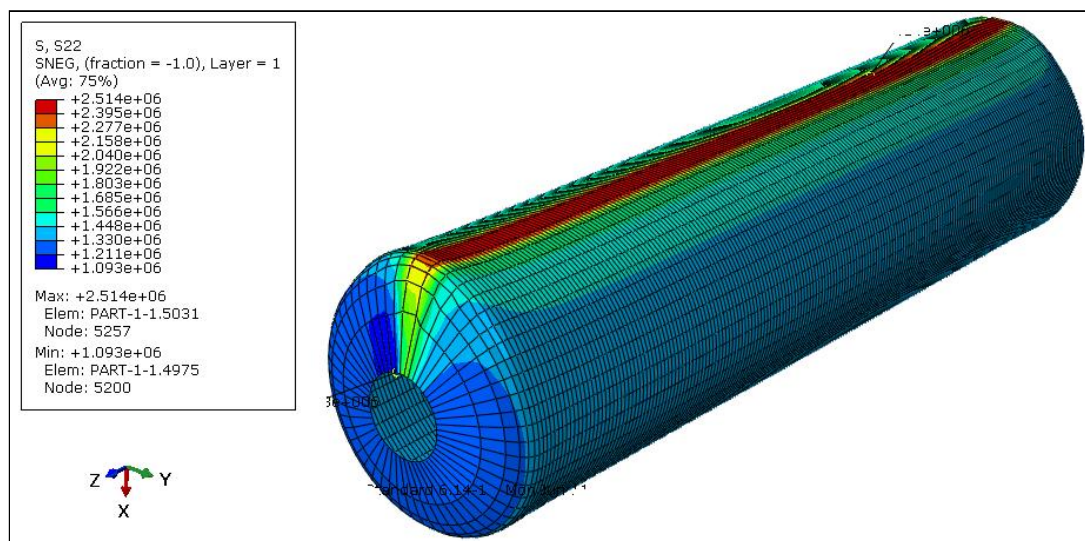
Para finalizar foram realizadas as simulações com o *software* com o intuito em encontrar as máximas pressões internas no tubo nas direções S11 e S22. Estes resultados podem ser verificados conforme FIGURAS 74, 75 e 76.

Figura 74 - Tensão do tubo para S11.



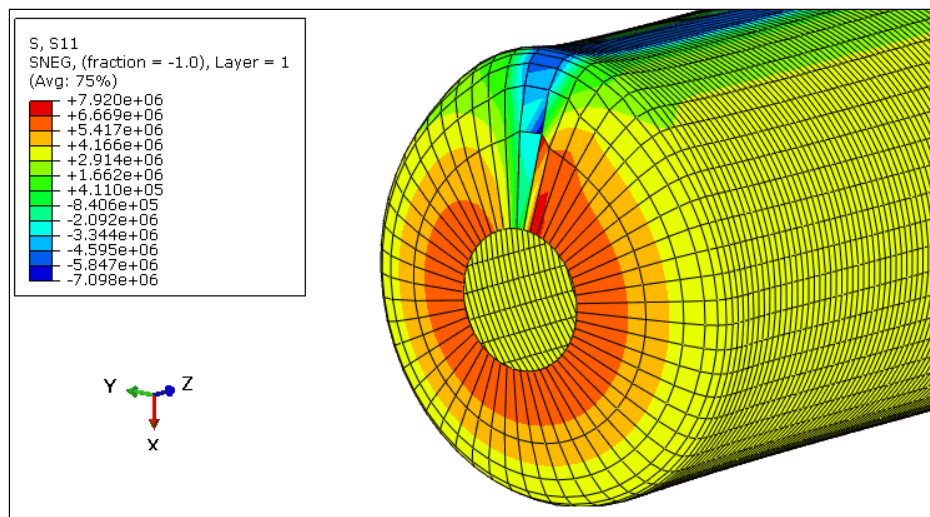
Fonte: Do autor (2018).

Figura 75 - Tensão do tubo para S22.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 76 - Detalhe ampliado da tensão do tubo para S11.



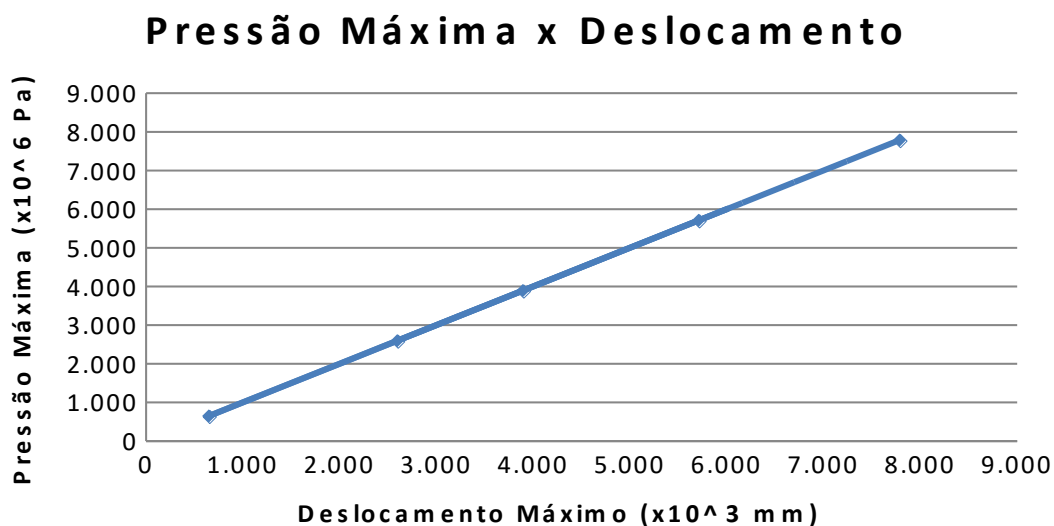
Fonte: Do autor (2018).

Com base nos valores encontrados na Figura 74, e 75 pode-se afirmar que a falha para Tensão Máxima ocorre com uma tensão axial na direção X (S22) de $2,514\text{E}+06$ Pa e com uma tensão transversal Y (S11) de $7,92\text{E}+06$ Pa. O maior valor que ocorre o rompimento do tubo equivale a $80,76 \text{ kgf/cm}^2$.

Pode-se verificar nas Figuras 74 e 75 que na parte superior estão concentradas as maiores tensões, ou seja, em alguma destas regiões ocorrerá o rompimento do tubo.

Para verificar quanto esta pressão máxima varia conforme o seu deslocamento, foi gerado um gráfico da pressão máxima x deslocamento conforme demonstrado na FIGURA 77.

Figura 77 - Gráfico pressão máxima x deslocamento



Fonte. Do autor (2018)

De acordo com as informações da Figura 77, pode-se verificar que conforme a sua pressão máxima vai aumentando, seu deslocamento também varia da mesma forma, ou seja, o seu comportamento manteve-se linear.

4.9 Análise teste hidrostático de pressão interna

Para realizar a análise de máxima pressão suportada nos testes hidrostáticos, montou-se o tubo no dispositivo e avaliou-se os resultados. Em um primeiro momento este tubo foi submetido a testes com baixas pressões, suportando 30 kgf/cm², conforme demonstrado na (FIGURA 78).

Figura 78 - Teste com baixa pressão.



Fonte: Do autor (2018).

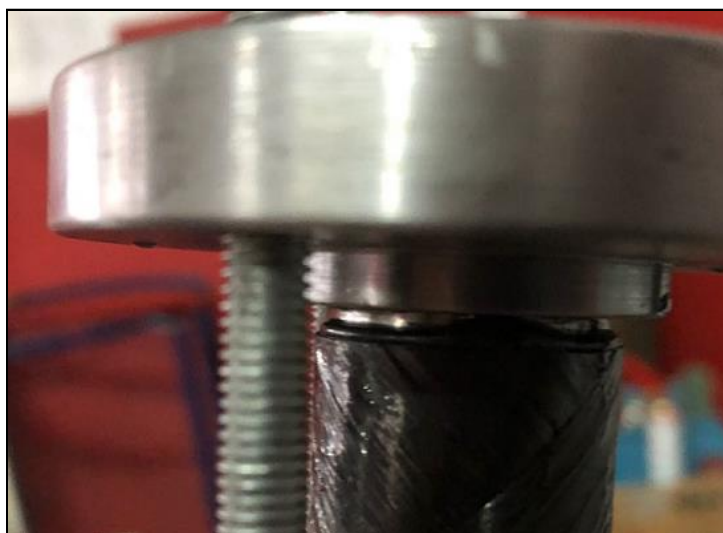
Após verificar-se que o tubo poderia suportar maiores pressões, realizou-se o teste em um tanque pressurizado para altas pressões. As pressões foram aumentando gradativamente de 5 em 5 até 60 bar (61,18 kgf/cm²). Após foi aumentado para 63 bar (64,24 kgf/cm²) conforme pode ser visualizado no Figura 79, mantendo-se estáveis quanto a estanqueidade, ao aplicar uma carga de 70 bar (71,38 kgf/cm²) o dispositivo cedeu, inviabilizando a continuidade do teste até o rompimento do tubo. Este fenômeno pode ser verificado conforme (FIGURA 80).

Figura 79 - Teste com alta pressão



Fonte: Do autor (2018).

Figura 80 - Dispositivo com o tubo após o teste hidrostático.



Fonte: Do autor (2018).

Ao analisar a Figura 80, pode-se inferir que o dispositivo cedeu, o tubo deslocou-se, vindo a sobrepor o O-ring, inviabilizando a continuidade dos testes.

Isso ocorreu porque ao aplicar a pressão de 70 bar (71,38 kgf/cm²) começou a deformar o tubo em sua extremidade inferior, no qual originou um pequeno aumento em seu diâmetro, evidenciando um início de vazamento.

4.10 Análise comparativa entre os métodos utilizados

Conforme análises realizadas para os estudos propostos do tubo de compósito seguem os valores obtidos conforme Tabela 30.

Tabela 30 - Valores das análises dos estudos

Tipo de Análise	Modelo Analítico	Modelo Estrutural	Teste Hidrostático
Valor	85 kgf/cm ²	80,76 kgf/cm ²	71,38 kgf/cm ² (Inconclusivo)

Fonte: Do autor (2018).

Com base nestes valores pode-se verificar que a diferença entre os valores encontrados no modelo analítico para o estrutural é de aproximadamente 5%. O valor do teste hidrostático não pode ser comparado, pois ao aplicar uma carga de 71,38 kgf/cm² o dispositivo apresentou problemas de vazamento.

4.11 Análise comparativo tubo aço comercial x compósito

Para fazer uma análise de comparativo entre um tubo de material comercial e o desenvolvido no estudo utilizou-se algumas tabelas fornecidas pelos fabricantes com suas propriedades descritas conforme Tabela 31 e 32.

Tabela 31 - Tubo Schedule NBR-5590.

Diâmetro			Parede mm	Peso Kg/M	Denon. Conf. API 5L	SCHED Nº	Pressão Teste Min.	
Pol.(")	Ext. mm	Int. mm					KG/CM2	PSI
1/4"	13,70	9,22	2,24	0,63	STD	40	49	700
		7,66	3,02	0,80	XS	80	60	850
3/8"	17,10	12,48	2,31	0,84	STD	40	49	700
		10,70	3,20	1,10	XS	80	60	850
1/2"	21,30	15,76	2,77	1,27	STD	40	49	700
		13,84	3,73	1,62	XS	80	60	850
		11,74	4,78	1,95	-	160	63	900
3/4"	26,70	6,36	7,47	2,55	XXS	-	70	1000
		20,96	2,87	1,69	STD	40	49	700
		18,88	3,91	2,20	XS	80	60	850
		15,58	5,56	2,90	-	160	67	950
1"	33,40	11,06	7,82	3,64	XXS	-	70	1000
		26,64	3,38	2,50	STD	40	49	700
		24,30	4,55	3,24	XS	80	60	850
		20,70	6,35	4,24	-	160	67	950
		15,22	9,09	5,45	XXS	-	70	1000

Fonte: Fonte¹⁴.

Tabela 32 - Tubo comercial ASTM A36

Norma	Graus	Composição Química (%)										Propriedades Mecânicas		
		C	Mn	P máx.	S máx.	Cu	Al	Si	Nb	Ti	Cr	LE (MPa)	LR (MPa)	Along. (%)*(3)
SAE	1006	0,08 máx.	0,45 máx.	0,040	0,050	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1008	0,10 máx.	0,50 máx.	0,040	0,050	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1010	0,08 - 0,13	0,30 - 0,60	0,040	0,050	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1012	0,10 - 0,15	0,30 - 0,60	0,040	0,050	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1020	0,17 - 0,23	0,30 - 0,60	0,040	0,050	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1021	0,17 - 0,23	0,60 - 0,90	0,040	0,050	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ASTM A36	-	0,25 máx.	-	0,040	0,050	*(1)	-	0,40 máx.	-	-	-	250 mín.	400 - 550	23
ASTM A570	Gr. 36	0,25 máx.	0,90 máx.	0,035	0,040	*(1)	-	-	-	-	-	250 mín.	365 mín.	22
	Gr. 45	0,25 máx.	1,35 máx.	0,035	0,040	*(1)	-	-	-	-	-	310 mín.	415 mín.	19
	Gr. 50	0,25 máx.	1,35 máx.	0,035	0,040	*(1)	-	-	-	-	-	345 mín.	450 mín.	17

Fonte: Site: <https://www.slideshare.net/LeandroSilvadeSouza3/manual-sobre-tubos>, slide 17.

Adaptado do autor.

As propriedades do tubo compósito de parede 1,2 mm podem ser evidenciadas na Tabela 33.

Tabela 33 - Tubo compósito

Propriedades	Unidades	Valor
Limite de Resistência	(MPa)	2550
Limite de Elasticidade	(GPa)	135

Fonte: Fabricante TORAYCA (2018). Adaptado do autor.

As pressões de teste, pode-se verificar de acordo com a Tabela 34.

Tabela 34 - Tubo compósito x aço comercial (Pressão Teste)

Ø Material	Especificação	Pressão Teste (min)(kgf/cm ²)
1" Aço	STD – API 5L SCH 40	49
	Parede – 3,38 mm (Special Tubos e Aços Ltda)	
	XS – API 5L SCH 80	60
	Parede – 4,55 mm (Special Tubos e Aços Ltda)	
1" Compósito Desenvolvido	Fibra de carbono + resina Parede – 1,2 mm	64,24

Fonte: Adaptado do autor (2018).

Logo, o tubo de compósito desenvolvido suportou pressões no teste hidrostático, isto indica que o mesmo tem capacidade para suportar pressões maiores com uma espessura de parede 3,8 vezes menor, se comparado a um de mesmo diâmetro, por exemplo o aço XS - API 5L SCH 80.

O peso por metro linear, pode-se verificar de acordo com a Tabela 35.

Tabela 35 - Tubo compósito x aço comercial (Peso)

Ø Material	Especificação	Peso (Kg / M)
1" Aço	XS – API 5L SCH 80 Parede – 4,55 mm (Special Tubos e Aços Ltda)	3,24
1" Compósito Desenvolvido	Fibra de carbono + resina Parede – 1,2 mm	0,15

Fonte: Adaptado do autor (2018).

Conforme os valores da Tabela 35, pode-se inferir que o tubo de compósito desenvolvido se comparado com o aço XS - API 5L SCH 80, possui uma diferença em sua massa em torno de 21,6 vezes menor por metro linear.

5 CONCLUSÕES

De acordo com objetivo proposto, na qual este estudo avaliou a validação de um tubo compósito polimérico reforçado com fibra de carbono para aplicações com pressões até 12 kgf/cm² fabricados pelo processo de enrolamento filamentar em escala laboratorial, estes submetidos à pressão interna, através de análises analíticas, estruturais e testes hidrostáticos, pode-se inferir as seguintes constatações:

- A fabricação dos tubos no laboratório pelo processo de enrolamento filamentar, proporcionou uma experiência nova com manuseio de materiais, equipamentos e softwares nunca antes utilizados.
- Na análise analítica com o auxílio do *software Helius Composite 2017*, quanto ao envelope de falhas, pode-se verificar que não ocorreu falha, nenhuma tensão encontrada na análise está fora da região das tensões calculadas, portanto, as cargas máximas S11 e S22 não foram ultrapassadas.
- Ainda na parte analítica para falhas em potencial na lâmina, não foi encontrado indicativo de falha, isto caracteriza que a lâmina está dimensionada com segurança para os níveis de cargas previstas. As análises dos critérios de *Tsai-Hill* e Tensão Máxima para tensão e deformação em relação as camadas ficaram iguais, pois neste estudo as mesmas são simétricas.

- Quanto ao indicativo de pressão máxima suportada na análise analítica, pode-se inferir que todas as falhas ocorrem na parte superior da camada 2, de maneira abrupta, tanto para o critério de Tensão Máxima quanto para *Tsai-Hill*. Quando esse fenômeno ocorre, a camada particular falha e a sua rigidez é drasticamente reduzida para simular a consequência de sua falha. Utilizou-se o valor de 85 kgf/cm² de pressão máxima nos cálculos das forças/tensões para simular a falha.
- Na análise estrutural por elementos finitos com auxílio do *software* Abaqus, cuja finalidade é simular com uma maior exatidão e segurança os resultados que podem levar a uma falha no material, após realizar a convergência de malhas, modelagem e simulação do tubo, pode-se inferir que o maior valor simulado para ocorrer o rompimento do tubo equivale a 80,76 kgf/cm².
- No teste hidrostático pode-se inferir o tubo manteve sua estanqueidade estável até 64,24 kgf/cm², no instante em que foi submetido a uma pressão de 71,38 kgf/cm² o dispositivo cedeu, inviabilizando a continuidade do teste até o rompimento do tubo.
- Em relação ao tubo quanto ao comparativo entre as pressões máximas suportadas nos estudos analíticos, estruturais e hidrostáticos, verificou-se uma variação em torno de 5%, sendo que o hidrostático tornou-se inconclusivo.
- Pode-se verificar também que estes tubos de compósito em comparação com os aços comerciais possuem limites de resistência e elasticidade muito superiores. Para as mesmas pressões de testes pode-se utilizar um tubo com parede 3,8 vezes menores e sua massa possui uma diferença de 21,6 vezes.
- Quanto ao esperado dos testes, inicialmente tinha-se a expectativa de fazer somente um tubo que suportasse pressões até 12 kgf/cm², após fabricar o tubo de compósito e realizar os testes, tanto para os métodos

analíticos, estruturais e hidrostáticos, pode-se verificar que o mesmo poderia ir além do estimado.

- De um modo geral, acredita-se que este estudo do tubo compósito polimérico reforçado com fibra de carbono para aplicações com pressões até 12 kgf/cm² fabricados pelo processo de enrolamento filamentar pode ser considerado como validado, pois atendeu as pressões mínimas exigidas para sua utilização.

5.1 Sugestões futuras

Com a intenção de aperfeiçoar o estudo, sugere-se fazer as seguintes melhorias:

- Confeccionar e analisar tubos com diferentes angulações e camadas, com a finalidade de verificar a influência das máximas pressões nos resultados;
- Desenvolver um *script* na linguagem *python*, com a finalidade de melhorar o refino das malhas na incorporação do efeito mosaico para fornecer uma modelagem mais realista da distribuição real dos seus valores de tensão;
- Elaborar um dispositivo de teste hidrostático para obter uma maior pressão, se possível até o rompimento total do tubo e comparar com os resultados das análises analíticas e estruturais.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, F.H. ***Design and fabrication of low cost filament winding machine.*** *Materials and Design*, p. 28, 234-239, 2007.

ALMEIDA, Jr J. H. S. ***Carbon fiber-reinforced epoxy filament-wound composite laminates exposed to hygrothermal conditioning.*** *Journal of Materials Science*; 51(9), p. 4697-4708, 2016.

ALMEIDA, Jr J.H.S; Staudigel, C., Caetano, G.L.P.; Amico, S. C. ***“Engineering properties of carbon/epoxy filament wound unidirectional composites,”*** *In 16th European Conference on Composite Materials – ECCM16, Seville/Spain,,* pp. 1-8, 2014

ALBUQUERQUE, R. J., 2005, ***Desenvolvimento de Material Compósito para Reforço de Dutos de Aço.*** Dissertação de M.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ALVES, F. A., ***Elementos Finitos – A Base da Tecnologia CAE,*** Érica, São Paulo, 2000.

ALVES, I. G., 2006, ***Análise do Comportamento Mecânico de Anéis Compósitos Íntegros e com Defeitos Submetidos a Ensaio de Tração.*** Dissertação de M.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

AGARWAL, B. D.. ***Analysis and performance of fiber composites.*** 3.ed., 2006 by John Wiley & Sons, Inc. 2006.

AZARAFZA, R.. ***Analysis and optimization of laminated composite circular cylindrical shell subject to compressive axial and transverse transient dynamics loads.*** *Thin-Walled Structures*, v. 47, p. 970-983, 2009.

BARBERO, E. J. ***Introduction to composite materials designs.*** New York: Taylor & Francis Group, 1999.

BARBOSA, A. P. C. **Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites**, Elsevier Ltda. All rights reserved, 2016.
<www.elsevier.com/locate/compositesb>, acessado em 10 out. 2017.

BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS H., **Física para Universitários – Mecânica.**; McGraw Hill, Brasil, 2012.

COMPOSITE UK – **Trade Association**. <https://compositesuk.co.uk/composite-materials/applications/oil-and-gas>>, Acessado em 12 mai. 2018.

DANIEL, I. O. **Engineering mechanics of composite materials**. Ed 2. New York:Oxford University Press, 1999.

FLUHELYI, P. **Monografia Análise de tensões em tubulações com e sem reparo compósito, submetidas a pressões hidrostáticas internas.**, Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Mecânica. 2006

FMA, MIRANDA, H.D.; MARQUES, A. T. **Stress-strain constitutive relation in the filament winding manufacturing process**. In: 1st International Conference on Composite Materials and Structures, Oran/Algerian, 18-10, nov. 2009, p.1-5.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**. 5^o ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, Faria H, Pires.

Hill R. **The mathematical theory of plasticity**. 1st Ed. London: Oxford University Press, 1998.

JOHNSON, B. D. **Composite Production Riser Development and Qualification Test Results, Third International Conference on Composite Materials for Offshore Operations**, Houston, 2006. < <https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404>>. Acessado em 6 out. 2017.

JONES, R. M. **Mechanics of composite materials.**; ed.2, Taylor & Francis, Inc. 1999.

JOYCE, P. **Macromechanical Macromechanical Analysis of Analysis of Laminates.**
<https://www.usna.edu/Users/mecheng/pjoyce/composites/Short_Course_2003/8_PAX_Short_Course_Laminat-Analysis.pdf>, 2003. Acessado em out. de 2017.

PEREIRA, N. M. C.. **Desenvolvimento de Reservatórios em Materiais Compósitos**. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica Junho 2017 FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto.

PIGGOTT M. **Load Bearing Fibre Composites**. 2Ed. 2002 Kluwer Academic Publishers.

KAW, K.. **Mechanics of Composite Materials**.; A CRC title, part of the Taylor & Francis imprint, a member of the Taylor & Francis Group, the academic division of T&F Informa plc.ed 2., Nova Iorque, CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.

LEVY, N. F.; PARDINI L. C. **Compósitos Estruturais**. Blucher, 2006.

MALICK, P.K.. **Fiber reinforced composites, Materials, Manufacturing, and Design by Taylor & Francis Group**.; LLC, 2007.

MEMON B .A.; Su, X. S. **Arc-length technique for nonlinear finite element analysis**.; J Zhejiang Univ-Sci A 2004;5(5):618-628.

MENDONÇA, P. T. R. **Materiais Compostos & Estruturas – Sanduíche**.; 1.ed. cidade. Manole, 2005.

MENICONI, L. C. M.; REID, S. R.; SODEN, P. D. **Preliminary design of Composite riser stress joints**. Composites – Part A: applied science and manufacturing. vol. 32, p. 597-605, 2001.

MISTRY, J.; LEVY-NETO, F. **A procedure for analyzing the strength of composite domes by axisymmetric shell finite elements**. Composites Engineering. 4(2);169-180:1994.

MOON, C. J. et al. **Buckling of filament-wound composite cylinders subjected to hydrostatic pressure for underwater vehicle applications**. Compos Struct 2010; 92: p. 2241-2251.

MOROZOV, E. V. **The effect of filament-winding mosaic patterns on the strength of thin-walled composite shells**, Elsevier Ltda. All rights reserved, 2006. <www.elsevier.com/locate/compstruct>, acessado em 03 jul. 2018.

NAIK, G.N. **A failure mechanism based failure theory for laminated composites including the effect of shear stress**. Composite Structures; p.69, 219–227;1999.

NAIK, G. N. **A failure mechanism-based approach for design of composite laminates**. Composite Structures; p.45, 71-80, 1999.

SRIKANTH, L.; RAO, R. M. V. G. K. **Concurrent studies on braided and filament wound carbon fiber composites, a comparative appraisal**. Journal of Reinforced Plastics and Composites, p.1359–1365, 2011.

STARK, W. ***Carbon-fibre epoxy prepreg (CFC) curing in an autoclave analogue process controlled by Dynamic Mechanical Analysis (DMA)***. Polymer Testing; 32, p.1487–1494, 2013.

TELLES, P. C. S. **Tubulações Industriais, Cálculo**, ed.6, Editora LTC, São Paulo, 1999.

TITA, V.. **Apostila projeto e fabricação de estruturas em material compósito polimérico**, Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos Engenharia Aeronáutica.

TSAI, S. W. ***Strength theories of filamentary structures. In: Fundamental Aspects of Fiber reinforced Plastic Composites*** (Schwartz RT e Schwartz HS, eds.), Wiley Inter-Science, New Yours, EUA, 1968.

VANDERPLAATS, G. N. ***Numerical Optimization Techniques for Engineering Design - With Applications***. Ed. McGraw-Hill, 1984.

VASILIEV, V.V. ***Composite pressure vessels: analysis, design and manufacturing. Bull Ridge Publishing***, Blackbursg, Virginia, USA, 2009.

WILLIAN D. CALLISTER, Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 7 Ed., Editora LTC, Rop de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.



UNIVATES

R. Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95900.000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09